

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特許公報 (B2)

(11) 特許番号

第2816365号

(45) 発行日 平成10年(1998)10月27日

(24) 登録日 平成10年(1998)8月21日

(51) Int.Cl.⁶
C 23 F 4/00
H 01 L 21/302
H 05 H 1/46

識別記号

F I
C 23 F 4/00
H 05 H 1/46
H 01 L 21/302

A
A
Z

請求項の数 2 (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願平2-251522
(22) 出願日 平成2年(1990)9月19日
(65) 公開番号 特開平4-128393
(43) 公開日 平成4年(1992)4月28日
審査請求日 平成4年(1992)7月10日
審判番号 平7-18847
審判請求日 平成7年(1995)8月31日

(73) 特許権者 99999999
株式会社 ユーハ味覚糖精密工学研究所
大阪市中央区神崎町4番12号
(73) 特許権者 99999999
森 勇蔵
交野市私市8丁目16番9号
(72) 発明者 森 勇蔵
大阪府交野市私市8丁目16番9号
(74) 代理人 弁理士 柳野 隆生

合議体
審判長 酒井 正己
審判官 能美 知康
審判官 山田 勇毅

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ラジカル反応による無歪精密加工装置

1

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】高周波電圧を加工用電極へ供給する高周波電源と、前記高周波電源と負荷とのインピーダンスを整合させる整合器と、前記高周波電源より供給される高周波電圧を昇圧する空洞共振器と、前記空洞共振器を接続し、内部の反応室に加工種に応じた所望形状の電極及び被加工物を配するとともに、互いの相対位置を可変となし、反応ガス及び不活性ガスを含む雰囲気気体を内部に供給し且つ所定圧力に維持するためのガス供給系を付設した反応容器とからなり、加工用電極の近傍で発生した不活性ガスに基づくプラズマによって反応ガスを励起して反応性に富んだ中性ラジカルを生成し、該中性ラジカルと被加工物を構成する原子又は分子とのラジカル反応によって生じた揮発性物質を気化させて除去し、被加工物を加工してなるラジカル反応による無歪精密加工装置

2

であって、前記空洞共振器として共振周波数チューナーを内蔵した偏平な半同軸型空洞共振器を用いて昇圧された高周波電圧を前記加工用電極に印加し、反応容器内の雰囲気気体の圧力を1気圧以上の高圧力に設定するとともに、前記高周波電源の周波数と、加工用電極に印加される電圧と、加工用電極と被加工物間の加工ギャップとを、少なくとも不活性ガスに基づくイオンが該加工ギャップ内に捕捉されるように設定してなることを特徴とするラジカル反応による無歪精密加工装置。
【請求項2】前記空洞共振器として共振周波数チューナーを内蔵した偏平な半同軸型空洞共振器を用い、該空洞共振器の内部に同軸状に突設した内側円筒壁の内端を閉塞する中心円板壁と対向する空洞共振器の円板壁との間に平行ギャップを形成し、該ギャップで昇圧された高周波電圧を前記加工用電極に印加してなる請求項1記載のラ

ジカル反応による無歪精密加工装置。

【発明の詳細な説明】

【産業上の利用分野】

本発明は、ラジカル（遊離基）反応を利用した無歪精密加工装置に係わり、更に詳しくは半導体製造用のシリコン及びゲルマニウム単結晶、又はガリウム-砒素化合物又はその他各種セラミック材料等の難加工脆性材料の切断加工、平面加工等の加工をすることの可能な精密加工装置に関する。

【従来の技術】

近年の科学技術の進歩は著しく、特に材料学の分野では、新機能物質の発見、開発が相次ぐなど非常に目覚ましいものがある。例えば、高温超伝導セラミックスの開発を始め、今後の科学技術の進むべき方向をも左右したといって過言ではない。

ところで、今まで材料開発から工業的応用に結びつけるためのキーテクノロジーとして、加工が重要な立場を持っていたわけであるが、上述したように今日の状況においては、その重要性はますます高まるばかりである。機能材料を加工し、素子化などを行う場合、材料本来の性能を最終的に持たせるためには、如何に結晶学的な乱れを導入せずに加工を進めて行くかが、重要な問題である。更に、今日の現状を付け加えるならば、最終表面仕上加工を行うためのいわゆる超精密加工の分野では、本出願人が開発したEEM (Elastic Emission Machining) (特開平1-236939号公報) を始めとして、非常に優れたものが既に開発されている。

しかし、その前加工段階をみると、今日の現状においても用いられる加工法は、研削やラッピングといった古典的な加工法である。これらは、材料のマクロな破壊現象を利用したものであることから、加工表面の結晶学的な制御性がなく、確率的に仕上加工層を上回る非常に深いダメージを与えてしまい、素子の性能を劣化させることができ非常に多かった。そのため今後更に高信頼性を要求される分野への応用は困難である。例えば、切断に関して、ダイヤモンドホイールによるダイシング加工法を用いた場合、その加工原理は微細クラックによる脆性破壊であるため、切断面を厚さ $100\mu m$ 程度除去しなければ、残留するクラックにより使用に耐える表面とはならない。また、研磨加工に関して、砥粒を用いた従来の方法を用いた場合も、脆性破壊を加工原理としている以上、前述の問題を有する。更に、レーザの熱的溶融現象を利用した穴加工及び溝加工等においても、加工面に熱的変質層が残っていた。

【発明が解決しようとする課題】

本発明が前述の状況に鑑み、解決しようとするところは、結晶学的な制御性を十分考慮し、更に多くの材料への適用性及び高能率性まで考慮した加工法としてCVM (Chemical Vaporization Machining) 法を確立し、極在しに化学的な反応を利用し、加工物の表面に確率的要

因として製品の信頼性を低下させていた残留クラック及び熱的変質層等の欠陥を全く生じさせず、しかも空間分解能の高い高精度の加工を行えるラジカル反応による無歪精密加工装置を提供する点にある。

ここでCVMとは、電気陰性度の大きい原子を励起状態にして、より化学反応性の強い中性ラジカルに変えて固体と反応させ、これを揮発性物質に変えて除去を行う加工のことである。

【課題を解決するための手段】

本発明は、前述の課題解決の為に、高周波電圧を加工用電極へ供給する高周波電源と、前記高周波電源と負荷とのインピーダンスを整合させる整合器と、前記高周波電源より供給される高周波電圧を昇圧する空洞共振器と、前記空洞共振器を接続し、内部の反応室に加工種に応じた所望形状の電極及び被加工物を配するとともに、互いの相対位置を可変となし、反応ガス及び不活性ガスを含む雰囲気気体を内部に供給し且つ所定圧力に維持するためのガス供給系を付設した反応容器とからなり、加工用電極の近傍で発生した不活性ガスに基づくプラズマによって反応ガスを励起して反応性に富んだ中性ラジカルを生成し、該中性ラジカルと被加工物を構成する原子又は分子とのラジカル反応によって生じた揮発性物質を気化させて除去し、被加工物を加工してなるラジカル反応による無歪精密加工装置であって、前記空洞共振器として共振周波数チューナを内蔵した偏平な半同軸型空洞共振器を用いて昇圧された高周波電圧を前記加工用電極に印加し、反応容器内の雰囲気気体の圧力を1気圧以上の高圧力に設定するとともに、前記高周波電源の周波数と、加工用電極に印加される電圧と、加工用電極と被加工物間の加工ギャップとを、少なくとも不活性ガスに基づくイオンが該加工ギャップ内に捕捉されるよう設定してなることを特徴とするラジカル反応による無歪精密加工装置を構成した。

ここで、前記空洞共振器として共振周波数チューナを内蔵した偏平な半同軸型空洞共振器を用い、該空洞共振器の内部に同軸状に突設した内側円筒壁の内端を閉塞する中心円板壁と対向する空洞共振器の円板壁との間に平行ギャップを形成し、該ギャップで昇圧された高周波電圧を前記加工用電極に印加してなることが好ましい実施例である。

【作用】

以上の如き内容からなる本発明のラジカル反応による無歪精密加工装置は、反応ガスを含む1気圧以上の高圧の気体雰囲気中に配した被加工物の近傍に、電極に印加した高周波電圧によって不活性ガスに基づくプラズマを発生させ、その荷電粒子及び電子によって反応ガスを励起して反応性に富んだ中性ラジカルを生成し、該中性ラジカルと被加工物を構成する原子又は分子とのラジカル反応によって生じた揮発性物質を気化させて加工部分から除去することにより、被加工物の切断加工、平面加工

等の加工を行うのである。

更に、具体的には、高周波電源より供給する高周波電圧、電流を、整合器を通すことにより、任意の負荷に対してインピーダンス整合がとれ、伝送線及び空洞共振器との接続部での電力損失を最小限に抑制して供給することが可能となり、そして空洞共振器で不活性ガスを電離させるのに十分な電圧に昇圧して、加工用電極に供給するのである。そして、加工用電極に印加された高周波電圧によって該電極近傍で不活性ガスに基づくプラズマを発生させ、反応ガスを励起して中性ラジカルを生成するのである。この場合、反応ガス及び不活性ガスを含む雰囲気気体の圧力は、1気圧以上の高圧力に設定しているので、発生するプラズマは電極近傍に限定され、また中性ラジカルの分布も該電極近傍に限定され、そのため加工精度が高く、微細な加工も行えるのである。

また、高周波電源の周波数と、加工用電極に印加される電圧と、加工用電極と被加工物間の加工ギャップとを、少なくとも不活性ガスに基づくイオンが該加工ギャップ内に捕捉されるように設定し、加工ギャップ内でプラズマによって反応ガスを励起して中性ラジカルを効率良く生成するとともに、電界によって高速に加速されたイオンが被加工物に衝突してスパッタリングを生じないようにしているとともに、イオンによって被加工物に表面準位が生じるようなダメージを与えることを極力防止している。

[実施例]

(1) プラズマCVMの基礎概念

(加工原理)

本発明の加工装置の加工原理は、プラズマCVM (Chemical Vaporization Machining) であり、加工の素過程はケミカルエッティングやプラズマエッティングと同様に化学反応によるものであり、加工は被加工物（試料）にダメージを与えることなく行われる。

加工の進行は、反応ガスと試料の組合わせに大きく依存する。反応ガスとしては、試料と反応を起こし易く、しかも生じた反応生成物が蒸気圧の高い、揮発性物質になるようなものを選ぶことが必要で、加工の高能率化を考えた場合、試料と反応ガスの組合わせを決定することが重要となる。

本発明では、CVMを実現するために高周波プラズマを用いている。プラズマ内には活性化した中性ラジカルが多数存在している。これを用いて加工を行うわけであるが、この中性ラジカルと同時に電子、イオンといった荷電粒子が電界による作用で電極と試料の間を運動している。電子、イオンが大きなエネルギーをもって試料に衝突するとスパッタリングや熱的作用により、表面は損傷し、加工変質層が形成されることになる。これは、荷電粒子を電極間に閉じ込めて、試料への衝突を防ぐことができる。この時、加工は純粹に化学反応だけで進行することになり、電極、試料間において荷電粒子を捕

捉することが重要になる。

(プラズマCVMの特徴)

電気陰性度の大きい原子が被加工物表面の原子と結合すると、結合部に電子分極を生じ、被加工物表面の第1層と第2層の間の結合力が弱くなるために、表面原子の除去が容易になる。また、中性ラジカルを固体と反応させて揮発性物質に変える反応は、ケミカルエッティングと同じく純粹に化学的作用のみを利用しており、中性ラジカルの種類を変えることによって被加工物の材料も種々なものを選択できる。従って、CVMは材料内部に存在する種々の欠陥に基づく従来の機械的加工法と異なり、理想的な加工法である。

CVMにおいて、中性ラジカルの生成は、重要な過程であり、この過程にプラズマを利用したものをプラズマCVMと呼び、高圧力雰囲気気体中の微小空間内にプラズマを発生させることにより、加工の空間分解能を向上させることが可能となる。つまり、ケミカルエッティングでは表面層の微小量の除去しかできないが、プラズマCVMではプラズマ発生領域を加工の進行とともに走査制御することにより、被加工物の切断をも可能にするものである。このようにしてプラズマCVMでは、従来の機械的加工法と比べて加工変質層が極めて少ない加工が、また、ケミカルエッティングにはないような空間分解能を持った加工が可能となる。

プラズマの発生は、放電やレーザ照射などで実現できるが、本発明の加工原理であるプラズマCVMでは、電極と被加工物との間に高周波電界をかけることにより、電離度の小さい弱電離プラズマを得る。弱電離プラズマ内の粒子は、大部分が中性ラジカルとなっており、この活性化した中性ラジカルとの表面反応を利用して加工を行うのである。この時、残り少数の荷電粒子が不必要に大きな運動エネルギーを持ち、それが被加工物との衝突によって熱エネルギーに変わり、またスパッタリングを生じるのを防ぐため、電極に印加される電圧はプラズマを持続させるのに必要最小限にすることが重要である。

高周波電圧の周波数を上げると、電極間に存在する電子やイオンは電界の変化に追従できなくなり、電極に到達できなくなる。これを電子、イオンの捕捉というが、この状態では被加工物への電子、イオンの衝突が殆どないため、加工は純粹に化学的作用のみによって起こり得る。また、高周波電界を用いた場合、荷電粒子の捕捉と同時に、 SiO_2 、 Al_2O_3 のような絶縁体の加工が可能となる。更に、機械加工では困難であったセラミックスの加工を無歪に行えるようになる。

また、加工種に応じて様々な形状の電極を採用することができる。例えば、ワイヤーを張ってこれを電極とし、加工の進行とともに被加工物との間で相対運動させると、切断加工（カッティング）を行うことができ、平板の電極を用いる場合には、平面加工（ポリッシング）を行うことができる。更に、複雑な形状の電極を用い

て、その電極形状を被加工物に転写する加工も可能である。ここで、電極としては、反応性雰囲気内において腐食されることはならず、各反応ガスに対して耐蝕性をもつ材料を電極として使用し、又は電極表面にコーティングすることが必要である。

(プラズマCVDにおける化学反応)

次に、プラズマ内で起こる反応について述べる。プラズマは、電子とイオンの電荷密度が等しく、全体として電気的中性が保たれた状態であるが、高圧力におけるプラズマ中では、電離度が低く大部分が中性分子（原子）のままである。プラズマ発生領域内では、中性分子や電子、イオンが衝突を繰り返しながら、エネルギーの受渡しを行っており、電離、励起、解離の他に電子の付着や再結合、またこれらが組合わざった反応が起こっている。プラズマ内の中性分子は、印加された電界によって加速された電子やイオンの衝突を受け、その殆どが励起状態になることから、通常の分子よりも活性で化学反応性が高い。しかし、通常の励起状態は不安定でその寿命は短く（ 10^{-9} 秒程度）、光子（フォトン）を放出してその基底状態に戻る。ところが、中には寿命の長い励起状態、即ち準安定状態を持つものが存在する。第1表に主な気体のイオン化エネルギーと励起準位を示す。

第1表 主な気体のイオ
ン化エネルギー
と励起状態

物質名	イオン化エネ ルギー(eV)	主な励起準位(eV) ＊：準安定準位
He	24.587	*19.82 *20.62
Ne	21.564	*16.62 *16.72
Ar	15.759	*11.55 *11.72
F	17.422	
F ₂	15.83	
Cl	12.967	*0.11 *8.9
Cl ₂	11.59	
SF ₆	15.69	~9.8 14.3

この準安定状態は、光学的遷移が禁止、あるいは非常に小さい確率でしか起こらない状態でありこの状態からの脱出は、他の粒子等との衝突によって相手粒子からエネルギーをもらって更に励起あるいは電離したり、逆にエネルギーを与えてこれを励起、又は電離させることにより行われる。プラズマCVDにおける反応種は、主にこの準安定状態にある中性ラジカルである。

また、中性ラジカルは気体分子が解離するときにも生成する。気体分子の結合エネルギーは、一般に電離電圧や励起電圧よりも小さく、分子の解離は容易に起こり、この解離に伴って原子は励起したり、電子付着が生じたりする。第2表に主な反応ガスの結合エネルギーを示す。

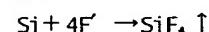
第2表 主な反応ガスの
結合エネルギー

結合(分子)	結合エネルギー(eV)
F-F (F ₂)	1.60
Cl-Cl (Cl ₂)	2.48
S-F (SF ₆)	3.34
C-F (CF ₄)	5.10

このように、反応ガスに用いる分子の結合エネルギーは、不活性ガス等の気体のイオン化エネルギー及び励起準位若しくは準安定準位より遙かに低く、衝突により反応ガスに基づく中性ラジカルが容易に生成する。

シリコン(Si)、アルミニウム(Al)とその酸化物のエッチャングは、半導体プロセスの中で特に重要であり、その化学反応を以下に述べる。

Siのプラズマエッチャングには、主にCF₄、SF₆等のフッ素系ガスが使われている。フッ素は化学作用が極めて高く（電気陰性度4.0）、またこのときの反応生成物であるSiF_xの蒸気圧が高いことから化学反応後の表面からの脱離が速やかに行われる。プラズマ内で解離生成したフッ素ラジカルF' と表面のSi原子はつきの反応を起こす。



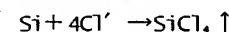
表面Si原子と反応するのは、プラズマ中で解離したF' だけではなく、SF₆、F₂、Cl₂等が表面に吸着した場合、1~2eV程度の解離エネルギーの減少が起こる。これはSi側から吸着分子へ電子が流入することによって分子の局所エネルギーが減少し、分解に至るためである。このように解離していないSF₆やプラズマ内で発生したSF_x (x:1~5) が表面に吸着した場合でも、エッチャングに必要なフッ素原子を供給することになる。

またSiO₂をエッチャングする場合、電気陰性度の大きい酸素原子があることから、表面のSi原子は正に帯電しており、フッ素原子が表面に接近しても容易に結合しないと予想される。そこで還元性気体を用いてSiO₂表面を還元する必要がある。還元性気体として一般にCOが用いられる。尚、CF₄を用いる場合は酸素は炭素と反応するところから還元性気体が不要である。この他に、H₂も添加されることがあり、この場合にはプラズマ中でフッ素ガスと反応することでHFが生成され、これによりSiO₂がエッチャングされることになる。

また、SiのエッチャングはCCl₄、PCl₃等の塩素系ガスに

9

よっても可能である（塩素の電気陰性度は3.0）。フッ素との反応と同様に、プラズマ内で解離生成した塩素ラジカル Cl' と表面のSi原子は次の反応を起こして SiCl_4 を生成する。



ここで、第3表に SiF_4 と SiCl_4 の化学的性質を示す。

第3表 SiとAlのフッ化物、塩化物の化学的性質

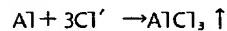
化合物名	融点(K)	沸点(K)	下記の蒸気圧(Torr)を示す温度(K)		
			10^0	10^{+1}	10^{+2}
SiF_4	$^1 196$	昇華		143	160
SiCl_4	203	331		238	278
AlF_3	1564	昇華	1229	1316	1419
AlCl_3	$^2 463$	$^3 456$		397	425

表中1は2.0atmでの値

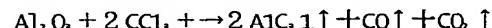
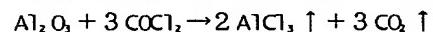
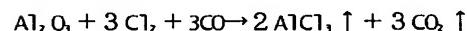
2は2.5atmでの値

3は1.0atmでの値

Alのエッチングには、主に CCl_4 や BCl_3 、 Cl_2 等の塩素系ガスが用いられる。フッ素系ガスを用いないのは、AlF₃の蒸気圧が低いからである。ここで、AlF₃とAlCl₃の化学的性質も第3表に示す。この場合もSiのエッチングと同様に、プラズマ内で解離したり、表面で解離したりして生成される塩素ラジカル Cl' により反応が進行する。



また、Al₂O₃のエッチングにも還元剤が必要で、塩素系のガスにCOを混ぜたり、ホスゲン COCl_2 を用いてエッチングを行うことが可能である。また、 CCl_4 単体でもAl₂O₃をエッチングすることが可能である。但し、この場合は、 CCl_4 が表面を衝撃しAl₂O₃を還元することによって行われる。



次に、プラズマCVDでは、フッ素系、塩素系等の腐食性ガス雰囲気で加工が行われるため、加工用電極には耐蝕性のある適切な材料を用いる必要がある。

電極材料を選択する場合に重要なことは、ハロゲンとの反応性の小さなもの、若しくは反応してもその反応生成物（ハロゲン化物）の蒸気圧が低いものを選ぶということである。この条件を満たす材料として金属フッ化物が挙げられる。第4表に空気中で安定で、比較的高融点のフッ化物の蒸気圧をいくつか示す。

10

第4表の1 主なフッ化物の蒸気圧

化合物名	融点(K)	沸点(K)	下記の蒸気圧(Torr)を示す温度(K)			
			10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
AlF_3	1564	昇華	982	1033	1090	1155
BaF_2	1563	2510	1208	1300	1403	1535
CaF_2	1676	2773	1377	1476	1585	1702
MgF_2	1521	2533	1237	1327	1428	1535

20

第4表の2 主なフッ化物の蒸気圧(続き)

化合物名	下記の蒸気圧(Torr)を示す温度(K)			
	10^{-1}	10^0	10^{+1}	10^{+2}
AlF_3	1155	1229	1316	1419
BaF_2	1535	1714	1954	2244
CaF_2	1702	1914	2128	2443
MgF_2	1535	1724	192	2280

これらの材料は既にフッ素と反応しているため、ハロゲンガス雰囲気中でも安定であり、蒸気圧も低いことからプラズマ中での蒸発も少ないと予測される。これらフッ化物は絶縁体であるため電極そのものとして使用できないため、電極表面へのコーティング材料として用いる必要がある。この場合、電極とコーティング膜との密着性や、コーティング膜の緻密性が重要である。

Alの自然酸化膜は緻密で、これにより内部への酸化が進まないことから、フッ素に対しても同様に緻密なフッ化物の膜がその表面に形成されると推測される。更に、フッ化物（AlF₃）自身の蒸気圧も低いことから、Al単体でも十分に電極として使用できると予想される。

また、フッ化物以外にもAl₂O₃、MgOなどの酸化物もプラズマエッチングのマスクにマスキング材料として用いられていることから、コーティング材料としての利用が可能であると予想される。

(高周波プラズマ内での荷電粒子の捕捉)

本発明において電極に印加する高周波電圧は、1気圧以上の高圧力の不活性ガスを電離し、発生したプラズマを維持するのに十分な大きさを有し、そのためその電界中の荷電粒子の運動は、電界方向にのみ加速され、熱速度を無視して近似的に記述できる。

高周波電界 $E = E_0 \sin(2\pi ft)$ 内での荷電粒子のドリフト速度 u は、

$u = (e \lambda E_0 \sin(2\pi ft) / 2m)^{1/2}$ と表せられる。ここで、 E_0 は最大電界強度、 e は電荷素量、 λ は荷電粒子の平均自由行程、 f は周波数、 t は時間、 m は荷電粒子の質量である。また、半周期の間の移動距離 l は、

50

$$1 = 0.38/f \cdot (e \lambda E_0 / 2m)^{1/2}$$

従って、荷電粒子を電極ギャップd（加工ギャップ）内に捕捉するためには、 $1 \leq d$ となる条件により、 $f \geq 0.38/d \cdot (e \lambda E_0 / 2m)^{1/2}$ を満たすことが必要である。

プラズマCVMでは、荷電粒子を電極と被加工物間で捕捉することが必要であることは前述の通りである。そこで、1気圧のHe雰囲気における加工ギャップdと捕捉周波数fの関係について以下に述べる。

先ず、電子の捕捉周波数を求める。電子がその平均自由行程 λ_e だけ進む間に、He原子の電離が可能となるような電界中 ($e \lambda_e E_0 = 24.58\text{eV}$) で電子を捕捉するため必要な周波数 f_e は、

$$f_e (\text{GHz}) \geq 558/d (\mu\text{m})$$

となる。これより、加工ギャップdが $10\mu\text{m}$ で 55.8GHz 、 $50\mu\text{m}$ で 11.2GHz となり、電子を捕捉するためにはマイクロ波以上の高周波電源が必要になる。

次に、イオンの捕捉周波数を求める。捕捉したイオンにHe原子を励起 ($e \lambda_i E_0 = 19.82\text{eV}$ (Heの最低励起電圧)) するだけのエネルギーを与えることによって、プラズマ内のラジカル密度を増加させることができると推測される。このようなイオンの捕捉周波数 f_i を求める

$$f_i (\text{MHz}) \geq 5870/d (\mu\text{m})$$

となる。これより、加工ギャップdが $10\mu\text{m}$ で 587MHz 、 $50\mu\text{m}$ で 117MHz となる。この場合、電子は捕捉できないが該電子の持つ最大エネルギーは 112eV であるが、この程度のエネルギーを持つ電子の衝突では被加工物表面へのダメージは殆ど生じない。

実際の荷電粒子の自由行程は、分布を持つため完全な捕捉は行えないが、これらの計算で得られた周波数の電源を使用することで、被加工物表面へのダメージをかなり減少させて加工できると推測される。

(2) カッティング装置

(装置の概略)

本発明のラジカル反応による無歪精密加工装置は、被加工物1と加工用電極2との相対位置関係及び加工用電極2の形状によって切断加工（カッティング装置）、平面加工（ボリッシング装置）、溝加工、穿孔加工等の種々の装置を構成できるが、ここではカッティング装置について説明する。

カッティング装置Aは、第1図に示す如く前記加工用電極2に高周波電圧を印加する高周波電源10と、該高周波電源10と負荷とのインピーダンスを整合させる整合器20と、前記高周波電源10より供給される高周波電圧を昇圧する空洞共振器30と、前記空洞共振器30を接続し、内部に前記被加工物1及び加工用電極2を配するとともに、反応ガスを含む雰囲気気体を1気圧以上の高圧力で密封若しくは流動させ得る反応容器40と、前記被加工物1と加工用電極2との相対位置を変化させる送り装置50

と、前記反応容器40に反応ガス等を供給するガス供給ユニット60と、各部の状態を検知するセンサ70と、該センサ70の信号が入力され、各部に制御信号を出力するコンピュータからなる制御装置80とから構成される。

各部の可動部はステッピングモータ又はサーボモータ等の駆動用モータで駆動され、その変化を各種センサ70にて検知し、その情報を制御装置80にフィードバックして、予め設定した最適状態になるように制御装置80で前記駆動用モータを制御するのである。

そして、前記高周波電源10の周波数を制御し、整合器20のチューニングを行うとともに、反応ガス等の流量を調節して反応容器40内の圧力を調整し、更に送り装置50を制御して、被加工物1と加工用電極2の相対位置を変化させ被加工物1を切断するのである。

本発明では、高圧力ガス雰囲気中でプラズマを発生、維持することでプラズマ領域を微小空間内に限定し、加工の空間分解能を高めている。そのため反応ガスを含む高圧力の混合気体内でプラズマを維持する必要があるが、一般に反応ガス（SF₆、Cl₂等）単体の高圧プラズマを発生、維持することは困難である。そこで、プラズマの発生、維持の容易な不活性ガス（He、Ne等）により反応雰囲気の加圧を行うことで、プラズマ発生領域を空間的に限定し、この領域内に反応ガスを供給混合する。この場合、プラズマを構成する荷電粒子は略不活性ガスにより、この中には準安定状態にある不活性原子が多数存在することから、これによる反応ガスの励起や解離が促進され、中性ラジカル密度が増加する。

この場合、不活性ガスと反応ガスの組合わせにより、加工速度が変化すると予想されるが、これは励起又は解離した不活性ガスから反応ガスにエネルギーを与える場合、その反応断面積はそれぞれの準位構造の間の関係に依るからである。また、加工雰囲気の圧力が高いほど荷電粒子の平均自由行程が短くなるので、プラズマ領域は小さくなり、加工の空間分解能が高まるが、この時ガス圧力と、被加工物1と加工用電極2との間隔（加工ギャップ）の関係によりプラズマの分布が変化するため加工特性も変化する。

（高周波電源10）

前述したように、加工ギャップ間に不活性ガスに基づくイオンを捕捉する必要があり、そのために100MHz以上の周波数の高周波電圧を加工用電極2に印加する必要があり、そのために用いる高周波電源10は、発振器11と高周波増幅器12からなり、発振器11で発生された146MHz帯高周波信号を、高周波増幅器12で所望電力に増幅するものである。本実施例では、加工ギャップを $10\sim200\mu\text{m}$ 程度の範囲に設定したので、前述の如くイオン捕捉を可能とする電源として、周波数146MHzのものを使用している。前記発振器11は、周波数範囲を $1\sim520\text{MHz}$ で可変となし、出力レベルは $-20\sim-123\text{dB}\mu\text{V}$ 開放端（ $-133\sim+10\text{dBm}$ ）であり、出力インピーダンスは 50Ω 、VSWR1.2以下

のものである。前記高周波増幅器12は、144MHz帯のものであり、その周波数帯域は144～148MHz、高周波電力は最大250W、励振電力は0dBm (@146MHz)、周波数特性は±4.5dB (@144～148MHz)、入力インピーダンスは50Ω、VSWR1.2以下のものである。

本発明では、高周波を扱うため通常の集中定数回路理論は適用できず、高周波電源10から負荷（加工用電極2）へ電力を効率的に供給するには種々の工夫が必要である。例えば、高周波電源10と負荷を導線（伝送線）で接続した場合、電源を出発した正の半サイクルの電圧の波が負荷に達するまでに、電源は次の負の半サイクルの波を送り込むというような事態が発生する。その現象をうまく利用して様々な回路素子が考えられ、後述する整合器20や空洞共振器30などがその例である。

こうして高周波電源10で発生された高周波電圧、電流は特性インピーダンスが50Ωの同軸線13にて負荷に供給される。

(整合器20)

高周波回路では、高周波電圧、電流は、伝送線上を波の形で伝搬するが、電源10から負荷に向かう入射波（前進波）と反対に負荷から電源に戻ってくる反射波（後進波）が存在し、入射波、反射波それぞれの電圧と電流の比をとると伝送線路の特性インピーダンス Z_c が求められる。

反射波が存在するということは、負荷に投入された電力の一部が消費されずに電源に戻ることを意味する。これを防ぐために伝送線に並列又は直列に容量又はインダクタンスを入れることによって、みかけのインピーダンスを特性インピーダンス Z_c と一致させ、反射波を消すことができる。これをインピーダンス整合と呼び、この場合、容量又はインダクタンスでは電力消費は起きないため、投入電力は全て負荷で消費されることになる。

本実施例では整合器20として代表的な3-スタブチューナを採用し、第1図及び第2図に概略示してあり、整合器20は、前記同軸線13と同じ特性インピーダンスの主伝送線21から3本のスタブ22、…を所定間隔を隔てて分岐し、各スタブ22を構成する伝送線の特性インピーダンスを前記主伝送線21の特性インピーダンスに合わせて Z_c としている。主伝送線21及びスタブ22は、内導体23の外径9mm、外導体24の内径20mmに設定し、略同軸線13の特性インピーダンスに合わせている。そして、各スタブ22の内導体23と外導体24の間には、その軸方向に摺動可能な円筒形導体からなる短絡体25を介装し、該短絡体25は、パルスモータ26によって回転される螺軸27に螺合した可動体28に固定した操作杆29にて軸方向に移動させ、実質的なスタブ22の長さを調節している。

その等価回路は第3図に示してあり、負荷のインピーダンスを Z_L 、点Cから負荷の方を見たときのインピーダンスを Z_c 、スタブの方を見たときのインピーダンスを

Z' とすると、

$$Z_c = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan k l_1}{Z_0 + j Z_L \tan k l_1}$$

$$Z_c' = j Z_0 \tan k l_1'$$

となる。ここで、

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_H}$$

であり、 λ_H はこの線路を伝搬する高周波の波長である。従って点Cより負荷とスタブの両方を見たときのインピーダンス Z_c'' は次のようにになる。

$$Z_c'' = \frac{Z_c Z_c'}{Z_c + Z_c'}$$

同様にして点Bより負荷とスタブを見たときのインピーダンス Z_b'' は、

$$Z_b'' = \frac{Z_b Z_b'}{Z_b + Z_b'}$$

となる。ここで、

$$Z_b = Z_0 \frac{Z_c + j Z_0 \tan k l_2}{Z_0 + j Z_c \tan k l_2}$$

$$Z_b' = j Z_0 \tan k l_2'$$

である。また、点Aより負荷とスタブを見たときのインピーダンス Z_a'' は、

$$Z_a'' = \frac{Z_a Z_a'}{Z_a + Z_a'}$$

となる。ここで、

$$Z_a = Z_0 \frac{Z_b + j Z_0 \tan k l_3}{Z_0 + j Z_b \tan k l_3}$$

$$Z_a' = j Z_0 \tan k l_3'$$

である。結局、点Aより負荷側には Z_a'' なる負荷があるよう見えることになる。そこで、 $l_1'、l_2'、l_3'$ を適当に選ぶことにより、即ち短絡体25を適当な位置に設定することにより、 $Z_a'' = Z_c$ とすれば、インピーダンス整合が行われ、投入電力が有効に負荷で消費されるようになる。本実施例では、前記短絡体25の可動範囲は、使用電源周波数146MHzの波長の半分(103cm)で、この範囲において並列に付加できるリアクタンスは $-j\infty \sim +j\infty$ である。また、各スタブ22、…は $\lambda/4$ の間隔で配置されている。実際の使用においては、前記高周波電源10

と整合器20の間にパワーモニタ71を配し、反射電力を検出してその信号を制御装置80に入力し、該制御装置80にて前記パルスモータ26を回転制御して、様々な負荷に対して完全に反射波をなくすることができる。

(空洞共振器30)

高圧力の反応ガス雰囲気中でプラズマを維持するためには、高電圧電源が必要であるが、小さい出力電力の電源でもこれを昇圧すれば、使用することができる。その手段として、本実施例では空洞共振器30を用いた。

共振器は低い周波数においてはコイルとコンデンサによって構成されるが、周波数が高い場合には導体壁で囲まれた空間よりなる空洞によって構成され、電磁界が外部に漏れず放射損失が少ないので空洞共振器の共振特性は鋭くなる。

第4図に本実施例で用いた空洞共振器30を示している。空洞共振器30は、導体からなる偏平な半同軸型空洞共振器であり、容量性負荷空洞共振器と呼ばれるものであり、外側円筒壁31の軸方向両端を軸と直交する円板壁32,33で閉塞し、一方の円板壁32の中心から他方の円板壁33へ向けて同軸状に内側円筒壁34を延設し、該内側円筒壁34の内端を閉塞する中心円板壁35を前記円板壁33に對向させて平行なギャップbを形成し、該ギャップbにはギャップ容量を調節するためにテフロンシート36(比誘電率 $\epsilon_r = 2.0$)を挿入している。また、前記外側の円筒壁31と内側の円筒壁34間にはリング状の短絡板37を密装するとともに、該短絡板37を調節具38にて軸方向に移動させることができるようにしている。該調節具38は、前記短絡板37に固定し円板壁32から外部に導出した複数の操作杆381, …と、該操作杆381を連結する連結板382と、該連結板382に螺合するとともに、円板壁32に定位位置回動可能に取付けられた調節螺軸383によりなり、該調節螺軸383を回転させることで、前記連結板382及び操作杆381を介して短絡板37を軸方向に移動させるので*

$$\hat{Y}(r) = \frac{Z_0(r) I(r)}{V(r)} = \frac{Y(r)}{Y_0(r)}$$

ここで、 $V(r)$ 、 $I(r)$ は、 $r = r$ における電圧、電流の値である。ラジアル伝送線路におけるインピーダンス $\hat{Y}(r)$

$$\hat{Y}(r) = \frac{j + Y(r_0) \zeta(x, y) t(x, y)}{G(x, y) + j Y(r_0) \zeta(x, y)}$$

但し、

$$t(x, y) = \frac{J_1(x) N_0(y) - N_1(x) J_0(y)}{J_0(x) N_0(y) - N_0(x) J_0(y)}$$

*ある。そして、前記中心円板壁35の中心に円板壁33を貫通し且つ該円板壁33に導通することなく加工用電極2に電圧を供給するロッド39を接続している。更に、前記整合器20に接続されるN型コネクタ14を円板壁33の外面所定位置に接続固定し、その中心同軸線を該円板壁33の内面に銅箔で形成した結合コイル15にて接続している。

そして、第4図に示す如く中心軸から内側円筒壁34の外面までの半径を r_1 、外側円筒壁31の内面までの半径を r_2 とし、円板壁33と短絡板37の間隔を b_1 とし、本実施例では $2r_2 = 486.6\text{mm}$ 、 $2r_1 = 100\text{mm}$ 、 $b_{1\text{MAX}} = 85\text{mm}$ に設定した。共振器内側は、表皮抵抗による損失を小さくするために銅板、銅箔を用いて形成した。

第5図(a)には、空洞共振器30を簡略化して示し、第5図(b)にその等価回路を示している。

前記コネクタ14から高周波電圧、電流が供給されると、前記ギャップbに電界Eが集中するため容量として働き、この容量Cとそれを取巻く導体壁によるインダクタンスLとで決まる周波数で共振する。共振器の高さ b_1 に対して半径 r_2 が大きい場合、インダクタンスLは主に上下の円板壁33と短絡板37によって決まる。そこで、分布定数回路としてとらえる場合、高周波の伝搬方向を半径方向にとったラジアル伝送線路を対象とする。ラジアル伝送線路は、伝搬するに従ってその形状が変わってくるため、同軸線路等の一般的の伝送線路とは異なった性質を持ち、特性インピーダンス Z_0 は半径 r の関数として次のように表される。

$$Z_0(r) = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\epsilon}\right) \frac{h}{2\pi r}}$$

但し、 h はラジアル伝送線路の高さである。ここで、半径 r におけるアドミッタンス $Y(r)$ を、伝送線路の特性アドミッタンス $Y_0(r)$ ($= 1/Z_0(r)$) で除した規格化アドミッタンス $\hat{Y}(r)$ を定義する。

※シス変換は次のように表せる。

17

18

$$G(x, y) = \frac{J_1(y)N_0(x) - N_1(y)J_0(x)}{J_1(x)N_1(y) - N_1(x)J_1(y)}$$

$$\xi(x, y) = \frac{J_0(x)N_0(y) - N_0(x)J_0(y)}{J_1(x)N_1(y) - N_1(x)J_1(y)}$$

$$x = kr, \quad y = kr_0$$

である。ここで、 $J_m(x)$ 、 $N_m(x)$ ($m=0,1$) は、 $10*$ となる。

それぞれm次のベッセル関数、ノイマン関数である。そこで、 $r=r_0$ で短絡終端しているラジアル伝送線路を $r=r$ で見たときの規格化アドミッタンス $\hat{Y}(r)$ を求める

$$\hat{Y}(r) = -j t(x, y)$$

となる。また、 $r=r$ から中心方向 ($r_0=0$) を見たときの規格化アドミッタンスは、

$$\hat{Y}(r) = -j \frac{J_1(kr)}{J_0(kr)}$$

次に、この空洞共振器30の共振周波数を求める。等価回路より、この共振器は異なる特性アドミッタンス $Y_0(r)$ と、 $Y_0'(r)$ を持つ開回路と閉回路が結合した形となっている。また、結合部の結合アドミッタンス jB_1 は次のように表される。

$$\hat{Y}(r) \approx -j k r / 2, \quad kr \ll 1 *$$

$$\frac{B_1}{Y_0'(r_1)} = \frac{2 k b_1}{\pi} \ln \frac{e b_1}{4 b}$$

ここで、 $r=r_1$ から見た開回路、閉回路のそれぞれのサセブタンス成分と結合アドミッタンスの和が零になれば、 $\hat{Y}_0'(r_1)$ に対するアドミッタンスの和としてこれを表すと、

$$\frac{B_1}{Y_0'(r_1)} + \frac{J_1(x)Y_0(r_1)}{J_0(x)Y_0'(r_1)} - t(x, y) = 0$$

となる。 $x:kr_1 \ll 1$ の条件で近似を行うと、

$$\frac{B_1}{Y_0'(r_1)} + \frac{b_1 x}{2 b} - t(x, y) = 0$$

となり、更にギャップ b ($r=0 \sim r_1$) に比誘電率 ϵ_r の誘電体を挿入した場合、特性インピーダンス $Z_0(r)$ \star は $\sqrt{\epsilon_r}$ 倍になる。また、ギャップ b 内の容量を C とすると、前式の第2項は、

$$\frac{J_1(x)Y_0(r_1)}{J_0(x)Y_0'(r_1)} = \frac{1}{Y_0'(r_1)} \cdot \omega C$$

となるので、ギャップ b 内に誘電体を挿入すると。 ϵ_r 倍になることがわかる。以上から、ギャップ b に誘電体 \star

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{B_1}{Y_0'(r_1)} + \epsilon_r \frac{b_1 x}{2 b} - t(x, y) = 0$$

共振周波数は、短絡板37を変位させて b_1 を変化させることによって変えることができる。共振条件を決定する容量 C は、共振器側の容量 C_0 と加工ギャップによる容量

C_1 の合成容量となる。ここで、容量 C_1 は加工の進行とともに変動する可能性があるため、共振器側の容量 C_0 が大きいほど合成容量 C の変化が少なく、共振周波数が安定

することになる。しかし、逆に容量 C_0 が小さいほど投入電力に対して得られる電圧は大きくなる。ここで、容量 C_0 の変化は数pFと見積もられるから、容量 C_0 を100~300 pFと設定し、前述の寸法が定められた。

そして、本実施例の空洞共振器30を用いることにより、投入電力10Wの場合に得られる電圧は、容量107pFの場合は約1kV、容量347pFの場合は約400Vと計算されるが、実際に高周波電圧を計測するのは困難である。実際にこの空洞共振器30を用いて約10気圧のHe、Ne雰囲気内でプラズマを発生（ブレークダウン）、維持することができたことから、加工を行うのに必要な電圧が得られていることがわかる。

(反応容器40)

反応容器40は導体で形成し、内部に反応室41となる空間を設け、反応ガスを含む雰囲気気体を10気圧程度までの高圧力で密封若しくは流動させ得るとともに、低真真空度まで減圧可能な気密容器であり、下部に前記空洞共振器30を取付け、反応室41内には被加工物1と加工用電極2が相対的に移動可能に設けられるものである。

加工用電極2は、加工の種類によって変わるものであり、切断加工する場合にはワイヤー2aが用いられる。そして、前記加工用電極2には、前記空洞共振器30から絶縁状態で反応室41内に導かれた電圧供給用のロッド39が接続されるとともに、加工用電極2は周囲とは絶縁状態にされ、また反応容器40は接地されている。

本実施例では、反応容器40は円筒状の容器本体42の上下に上蓋43と下蓋44が取付けられ、下蓋44は前記空洞共振器30の円板壁33を兼用している。そして、下蓋44の内面には絶縁体45を介してワイヤー送り装置46が設けられ、該ワイヤー送り装置46は、繰り送りドラムを有する供給部461と該供給部461から送られるワイヤー2aの巻き取りドラムを有する回収部462からなり、該ワイヤー2aに一定の張力を持たせるものであり、その張力を常時検知する張力計72が設けられている。

また、前記上蓋43には、被加工物1を取付けて前記ワイヤー2aに対して接近若しくは離間する方向に変位させる送り装置50が取付けられている。

更に、容器本体42の周囲にはプラズマの発生状態及び加工状態を目視するための覗き窓47が適宜設けられている。

また、反応容器40には、真空排気するためにロータリーポンプが取付けられ、真空度が0.1Torr以下の状態で反応ガスの導入が行えるようになり、更にガスフローをするためには、反応性、毒性の強い反応ガスを扱うこともあるので、該反応ガスの処理装置を備えた排気装置が適宜取付けられる。

(送り装置50)

送り装置50は、被加工物1を加工用電極2に対して接近又は離間させるためのもので、該送り装置50の下端の駆動部51は反応室41内に位置し、その先端に被加工物1

を取付けるステージ52が連結され、そして駆動部51及び軸受部が反応ガスによって腐食しないように、送り装置50と反応室41はペローズ53で隔離している。

前記駆動部51は、パルスモータ54の回転によって軸方向、即ち垂直方向に移動可能にされ、ステージ52に固定した被加工物1の送りは、制御装置80で速度制御している。

そして、被加工物1と加工用電極2との間隔、即ち加工ギャップdはギャップセンサ73で検知して、前記制御装置80にてパルスモータ54を制御し、所定幅の加工ギャップdが形成されるようにしている。

更に、パルスモータ、ハーモニックドライブ、ボールねじ、スライドの組合せによる精密微小送り機構を採用すれば、ミクロンオーダの精密送りを行うことができる。この送り装置50による寸法精度は、被加工物1の加工仕上りに大きく影響する。

(ガス供給系)

本実施例のカッティング装置のガス供給ユニット60は、第6図に示している。前記反応室41には、反応ガスポンベ61と不活性ガスポンベ62からそれぞれ流量計63, 64及び制御装置80にて制御可能な電動バルブ631, 641を介してガスを供給する。反応ガス及び不活性ガスを供給する前に、反応室41は予め0.1Torr程度まで減圧して、反応室41内の空気を排気するが、それにはバルブ65を介してロータリーポンプ66で減圧し、また反応室41内が1気圧以上の反応ガス等で充満している場合には、制御装置80で排気量を調節可能なリークバルブ67で反応ガス等を排出し、反応室41内の雰囲気気体の圧力を所望の値に設定できるようにしている。また、前記送り装置50のペローズ53内の圧力は、ステージ52の位置設定を高精度に行うために、反応室41内の圧力と常に等しいことが望ましく、そのため窒素ガスポンベ68からバルブ681, 682を介して送り装置50に供給できるようにしてあり、またバルブ682とバルブ683を通じてロータリーポンプ66又はリークバルブ67から排気できるようになしている。前記ペローズ53内の圧力と反応室41内の圧力差は差圧計74で検知し、それらの圧力差が零にあるように制御装置80でバルブ682, 683を開閉制御している。

反応ガスとしては、SF₆、CF₄、H₂、Cl₂等が用いられ、不活性ガスとしては、He、Ne、Ar等が用いられる。また、被加工物1が酸化物の場合には還元ガスも併用される。

(制御系)

制御系は、各部の状態を検知するセンサ70と、該センサ70からの信号を受けて予め設定された状態になるように各部に制御信号を出力するマイクロコンピュータからなる制御装置80とで構成される。

第7図は、高周波電源10の出力及びその周波数を制御する制御回路のブロック図を示している。制御装置80にて発生周波数が制御された発振器11で発生された高周波

信号は、高周波増幅器12で増幅された後、その高周波電圧、電流はパワーモニタ71を介して整合器（3-スタブチューナ）20に通して、更に加工用電極2に印加される。高周波電源10の出力はパワーモニタ71で測定し、その出力信号を受けた制御装置80が、設定した出力になっているかどうかを判断して、設定値になるように発振器11の出力を調節するのである。また、反応ガスと不活性ガスのそれぞれの流量や反応ガスと不活性ガスの混合雰囲気气体の圧力等、ガスの各種状態を検出するガスセンサ75と、加工ギャップd間で発生されるプラズマの密度、温度等を検出するプローブ76が設けられ、それらからの信号が制御装置80に入力され、それに基づき加工に最適な状態になるように各種バルブの調節又は高周波電源10の出力の調節を行うのである。

第8図は、インピーダンスのマッチング制御回路のブロック図を示している。前記整合器20にて負荷とのインピーダンス整合がとれてない場合には、整合器20から電源側への反射波が発生して、投入電力が負荷で効率的に消費されないので、前記パワーモニタ71によって反射波を検出し、その反射波の電力に比例する信号を受けた制御装置80が、整合器（3-スタブチューナ）20のパルスモータ26,…を制御して、反射波が零になるように短絡体25の位置を調節するのである。

第9図は、被加工物1の送り制御回路のブロック図を示している。送り装置50は、パルスモータ54を回転させて駆動部51を作動させ、そして該駆動部51にて被加工物（試料）1を下面に固定したステージ52を加工用電極（ワイヤー2a）2に対して相対的に移動させるのである。ここで、加工の進行と共に被加工物1と加工用電極2の間隔、即ち加工ギャップの間隔dは変化するので、その間隔をギャップセンサ73で検出し、その信号を制御装置80に入力して加工ギャップdが10~200μmの範囲内の設定値になっているかどうかを判断し、前記パルスモータ54に正転又は逆転の方向信号及び回転数（回転角）の指令信号を入力し、加工ギャップdが常に設定値になるようにするのである。

第10図は、各種ガス圧の制御回路のブロック図である。前記反応室41には反応ガスピンベ61及び不活性ガスピンベ62から流量計63及び流量計64を通してそれぞれガスが供給され、該流量計63及び流量計64を通るガス量を調節することによって反応室41の全圧力及び各ガスの分圧を設定するのである。図示したものは、流量計63,64とそれぞれ電動バルブ631,641が一体となったものを示し、特に電動バルブ631,641は示さなかったが、流量計63,64からのガス流量に関する信号を制御装置80に入力し、その信号に基づいて電動バルブ631,641に信号を送り、開閉操作して反応室41内のガス圧を制御するのである。また、送り装置50のペローズ53内には前述の如く窒素ガスピンベ68から窒素ガスが供給され、反応室41の圧力と略一致させるように、反応室41と送り装置50間に差

圧計74が設けられ、該差圧計74からの信号を受けた制御装置80は、窒素ガスの供給量、排気量を調節するコントロールバルブ682,683を開閉制御するのである。尚、送り装置50の駆動部51にガスの圧力差で駆動させる気体軸受機構を採用した場合には、前記差圧計74と併せて送り装置50に圧力計75を接続し、差圧計74と圧力計75の信号を受けて制御装置80が同様にそれにガスを供給するコントロールバルブを開閉制御するのである。

第11図は、加工用電極2としてのワイヤー2aの送り制御回路のブロック図である。ワイヤー2aは、ワイヤー送り装置46の供給部461から回収部462に繰り送られ、それぞの間に張られワイヤー2aの露出部分で被加工物1を切断するのであるが、精度よく直線状に切断するには所定以上の張力で、ワイヤー2aが断線しない張力以下に設定する必要があり、それを張力計77で検知して制御装置80に入力し、該制御装置80からの信号でワイヤー送り装置46の駆動モータを制御するとともに、ワイヤー2aは反応ガスによって浸食されるので、駆動モータの回転数を制御して、ワイヤー2aの送り速度を制御し、常時有効な部分を露出させるのである。

(3) ポリッシング装置

(装置の概略)

ポリッシング装置Bの構成は、基本的には前述のカッティング装置Aと同じであり、高周波電源10、整合器20、空洞共振器30及び反応容器40は全く同じであるので説明を省略する。

ポリッシング装置Bは、第12図に示す如く反応容器40内に、ステージ52に固定された平面状の被加工物1と、下蓋44に取付けた絶縁体45に固定した平面状の加工用電極2とを平行に対向させて配置し、該加工用電極2に高周波電源10、整合器20及び空洞共振器30を通して高周波電圧を印加し、加工用電極2の近傍でガス供給ユニット60によって反応室41内に供給された反応ガスと不活性ガスの混合雰囲気气体に基づく高圧プラズマを発生、維持して、反応ガスに基づく中性ラジカルを生成し、該ラジカルと被加工物1の表面に有する微小突出部分との選択的ラジカル反応によって生じた揮発性反応物質を昇華除去して、被加工物1の表面を平滑化するものである。また、送り装置50で被加工物1と加工用電極2との間隔を調節することによって加工深さを変化させることが可能である。また、加工用電極2としてワイヤー2aを被加工物1の加工面に対して平行に走査することによって、平面加工することも可能である。

前記カッティング装置Aと若干相違する点を以下に述べる。尚、カッティング装置Aと同一構成には同一符号を付して説明を省略する。

(送り装置50)

送り装置50のステージ52は、図示しない駆動部51を介して複数のパルスモータ54,…で5軸調節可能となし、被加工物1と加工用電極2との相対位置は勿論、平行度

をも調節できるようになしたものである。ボリッシング装置Bにおいて、被加工物1と加工用電極2が平行でない場合には、加工面の加工深さが不均一となり仕上りに大きく影響するので、両者を平行に維持することは重要なことである。

本実施例では、ステージ52に気体軸受的運動機構を探用し、バルブ55を通して供給した作動気体により負荷56でステージ52に流体力学的負荷を与え、それを検出する負荷センサ77と、作動気体の圧力を検出する流圧センサ78を備えている。

(ガス供給系)

第12図及び第13図にボリッシング装置Bのガス供給系を示している。ボリッシング装置Bにおいて、加工面の面積は比較的広いので、反応室41内に反応ガスと不活性ガスが均一に拡散されることが要求され、そのため反応ガスポンベ61と不活性ガスポンベ62から流量計63,64を介してリザーブタンク69に導き、その内部で混合した後、反応室41内に供給するのである。

(制御系)

第14図は、各種ガス圧力の制御回路のブロック図を示している。前述の如くリザーブタンク69に供給する反応ガスと不活性ガスの流量は、流量計63,64で検出され、混合ガスの全圧力と分圧を所望値に設定するため、流量計63,64からの信号を受けた制御装置80から、その電動バルブ631,641を開閉操作するのである。

第15図はステージの制御回路のブロック図を示している。バルブ55を通して供給された作動気体と負荷55によってステージ52は変位するが、この変位を制御するために負荷センサ77と流圧センサ78で状態を検出し、その信号を受けた制御装置80が前記バルブ55と負荷55を制御して、定められた状態になるようにステージ52の姿勢を制御するものである。

第16図は、加工用電極2としてワイヤー2aを走査する場合の制御回路のブロック図を示している。本実施例のワイヤー送り装置46は、ワイヤー2aを送ることは勿論、送り方向と直交する方向に移動可能なものであり、該ワイヤー送り装置46から送られるワイヤー2aの張力は張力計72にて検出し、その信号を制御装置80に入力して、張力を最適状態に設定する。一方、パルスマータ54で移動されるステージ52と、前記ワイヤー2aとの平行度をギャップ平行度センサ79で検出し、その信号を制御装置80に入力する。該信号を受けた制御装置80は、前記ワイヤー送り装置46とパルスマータ54に信号を入力してその平行度を常に保つようにするものである。尚、第12図に示したものは、加工用電極2を固定するものであり、ワイヤー送り装置46は示していないが、被加工物1と加工用電極2の平行度を検出するギャップ平行度センサ79は備えている。

(4) 加工用電極

プラズマCVDでは、フッ素系、塩素系等の腐食性ガス

雰囲気で加工が行われるため、加工用電極2には耐食性のある適切な材料を用いる必要があることは既に述べた。

従来の放電加工機のワイヤー電極として利用されてきたタンクスチールは、フッ素に対して容易に腐食され、加工時間をあまり長くとれない。そこで、ワイヤーの材質としては耐食性があり、また張力をかけるため機械的強度の大きなものを選ぶ必要がある。

フッ素に対して耐食性を示す材料としては、例えばAlがあるが、Alのワイヤーは機械的強度が弱いため実用的でない。耐食性材料として第4表の1及び第4表の2に示したフッ化物には導電性がなく、そのものでは電極として使えないが、タンクスチール、モリブデン等の表面にこれらのフッ化物をコーティングすれば、電極として使える可能性があることを実験により確認した。即ち、Al、Al₂O₃、MgF₂のバルクに対して、タンクスチールワイヤーを用い、ガス雰囲気はHe(3気圧)+SF₆(0.1気圧)で、加工時間は20~30分で加工実験を行った結果、Alの表面は薄いフッ化物の膜で覆われており、またAl₂O₃、MgF₂の表面は、全く変化しないことを確認したのである。これにより、緻密なコーティング膜を機械的強度を有し且つ導電性のワイヤー表面に形成することができれば、耐食性を有する電極を得ることができる。

これらのコーティングの効果は、前述のボリッシング装置Bを用いて、加工ギャップ内でSF₆プラズマを発生させ、この中に(a)真空蒸着(膜厚4μm)と(b)イオンプレーティング(膜厚1μm)によってAlをコーティングした銅ワイヤー(50μmφ)と、(c)コーティングを行っていない銅ワイヤーを曝して調べた。実験条件は、Heを100Torr、SF₆を1Torr以下とし、電力75W、時間120分とした。その結果は第17図に示している。これにより、Alコーティングを行っていない銅ワイヤー表面はフッ素に侵され荒れています(第17図(c))が、Alコーティングを行ったワイヤーは、両者ともAlの光沢が残っており、表面に腐食の跡は見られない(第17図(a), (b))。これより、Alのコーティングを行うことでワイヤーの耐食性が大幅に向上することが判った。

以上により、ワイヤーに限らず加工用電極2の表面に耐食材料をコーティングすることで、電極の消耗を防ぐことができる。

電極材料としては、フッ素系の反応ガスに対しては、前述のAlの他に、反応生成物の蒸気圧が低い元素、Ni、Ni-Cr、Mg、Mn、Ca、Ce、Ba、Sr等があり、塩素系の反応ガスに対しては、Ti、Ni、Ni-Cr、インコネル、モネル、グラファイト(C)を用いることができる。

また、電極のコーティングに関しては、低蒸気圧のフッ化物、塩化物のコーティング(プラズマCVD、イオンプレーティング、真空蒸着)や、表面処理(プラズマ酸化、熱酸化、フッ化、塩化)や、複合電極(不活性元素

+高張力、高融点材料)、例えばWの表面にNiを電気メッキしたり、W又はMoの表面にカーボン(C)をプラズマCVD等による処理、反応ガス供給用高蒸気圧フッ化物(NaHF₂, KHF₂, NbF₅, BrF₅, Tf₂, HF等)又は塩化物(HCl, CCl₄, S₂Cl₂, SCl₂等)のコーティング及びディップしたものが使用できる。

更に、ボリッシング装置Bの電極として、導電性多孔質電極を用いることにより、該多孔質を通して雰囲気ガスを加工ギャップ間に送るフローシステムを構成することも可能である。10

(5) 加工特性

(加工面の一般的特性)

前述のカッティング装置Aによって50μmφのワイヤーを用いて実際に切断加工を行った結果を以下に示す。

切断途中における加工溝の形状をタリサーフで測定し、また加工溝底部の表面粗さをタリステップで測定した。第18図には、加工条件としてHe9atm+SF₆ 1Torr, 電力14W, 加工時間3分、加工ギャップ20μmとした場合の加工溝の形状を示し、第19図には加工条件としてHe3atm+SF₆ 1Torr, 電力34W, 加工時間3分、加工ギャップ80μmとした場合の加工溝底部の表面状態を示している。それぞれのグラフは、横軸に表面に沿った長さ、縦軸に表面の凹凸の深さを示し、スケール及び単位はグラフ中に示している。

また、ノマルスキ型微分干渉顕微鏡によって、加工条件として第19図に示したものと同様にHe3atm+SF₆ 1Torr, 電力34W, 加工時間3分、加工ギャップ80μmとした場合の加工溝を観察した結果を第20図に示している。

この結果、加工溝の開口幅はワイヤー電極の直径50μmの略2倍の100μm程度であり、その加工溝底部の表面の凹凸は0.1μm以下に抑えられていることが判る。

(雰囲気ガスの種類による加工速度の変化)

加工速度は、被加工物1の材質に合った雰囲気ガスの選択と、その圧力、投入電力、加工ギャップ等によって大きく影響する。その中で最も重要なパラメータは、雰囲気ガスの選択である。

そこで、Siの加工を、反応ガスとしてSF₆を用いて行う場合、加工効率が最も上がる不活性ガスを選択するため、先ずHe, Ne, Arの単体の性質を調べるためにワイヤー電極のまわりにプラズマを発生、維持するのに必要な電力を求めた。この結果を第5表に示す。

第5表 プラズマの発生、維持に必要な電力

気体	発生電力(W)	維持電力(W)
He	23.7	17.8
Ne	16.2	5.7
Ar	<70	6.3

圧力: 3atm

ワイヤー電極: Ni-Cr 50μmφ

これより、Heのプラズマを発生、維持するためには多くの電力が必要であり、Neはその逆で発生、維持ともに容易に行えることが判る。また、Arの場合は、プラズマの発生は困難であるが、その維持は容易に行えることが判った。この傾向はこれらのガスを混合した場合も同じで、例えばHeとNeを混合する場合、発生電力、維持電力とともにHeの分圧とともに上昇する。

次に、不活性ガスとSF₆の混合気体を用いて、P型Si(比抵抗0.01~0.02Ωcm)の加工を行った。ワイヤー電極はNi-Cr:50μmφのものを用い、加工時間は4~6分、加工ギャップは280μmとした場合の加工において、不活性ガスの種類によって加工速度が変化することを第6表に示す。表中の投入電力は、それぞれのプラズマを維持するための最小限の電力である。

第6表 不活性ガスの種類による加工速度の変化
(被加工物: P型Si)

ガス組成(atm)	電力(W)	加工速度(μm/min)
Ne : 3.0 SF ₆ : 0.1	31	0.4
Ne : 1.5 He : 1.5 SF ₆ : 0.1	50	0.5
He : 3.0 SF ₆ : 0.1	73	0.9

このとき、プラズマ内には不必要に大きなエネルギーを持つ荷電粒子は少なく、主に化学的な作用により加工が進行すると考えられる。この結果により、SF₆の解離、励起を起こすためにはHeの方が適していることが判る。また、ArとNeについても同様な実験を行った結果、ArとNeでは加工速度に差はないことが判った。

また、加工速度は、当然反応ガスの種類によっても影響を受ける。前記同様の加工条件で、反応ガスとして、SF₆の代わりにCl₂を用いてP型Si(比抵抗0.01~0.02Ωcm)の加工実験を行った。投入電力は14Wで、その他の条件は全く同じである。その結果をSF₆と比較して第7表に示す。

第7表 反応ガスの種類による加工速度の変化
(被加工物:P型Si)

反応ガス	加工速度($\mu\text{m}/\text{min}$)
SF ₆ : 1Torr	3.7
He : 9atm	
Cl ₂ : 1Torr	~0
He : 9atm	

この結果、Cl₂を反応ガスとして用いた場合、Siの加工は殆ど進行しないことが判った。これは、フッ素と塩素の反応性の違いが挙げられ、またSF₆とCl₂の同体積中に含まれるハロゲン原子の数も異なるためである。また、SF₆に対してHeが最も加工能率を高めることは既に述べたが、Cl₂をあまり活性化できず、また反応生成物の蒸気圧も比較的低いからであると思われ、それぞれの要因によってCl₂の方が加工速度が低くなる。

(ガス圧力と加工ギャップによる影響)

ここでは、反応ガスとしてSF₆を用い、不活性ガスとしてHeを用いてガス圧力と加工ギャップが加工特性に及ぼす影響を調べた。加工ギャップを20~180μmと直線的に変化させ、一定量のSF₆(1Torr)に対してHeを1、3、9気圧混合した雰囲気の中、加工時間を3分間として、P型Si(比抵抗0.01~0.02Ωcm)を加工した。ワイヤー電極は50μmのタンクステンを使用した。

この加工の結果、被加工物の表面にできた加工溝の幅と圧力の関係を第21図に示す。この時、プラズマは1気圧と3気圧では全ギャップにわたって存在していたが、9気圧では20~100μmのギャップの間だけに存在していた。全体的にみて圧力の増加に伴って加工溝の幅が小さくなる傾向を有し、これはガス圧力の増加に伴ってプラズマの半径方向の広がりが小さくなることを示し、従って加圧することで加工の空間分解能が向上する。

また、1気圧と3気圧において、ギャップの狭いところでは、ギャップ内に存在している粒子密度が小さいため、ワイヤー電極、被加工物面上で失われてゆく電荷に対してプラズマを維持するために必要な電荷の生成が十分でないためにプラズマを維持できなくなり、電極と被加工物間にはプラズマが存在せず、プラズマはそのまわりの空間に存在しており、そのため加工溝幅が広くなつたものと思われる。一方、ギャップが広くなると、プラズマはギャップ内に集中するようになり加工溝幅は小さくなる。更にギャップが広がると、プラズマは主にワイヤー電極のまわりに集中し、被加工物面上でのラジカル密度分布がなだらかになるため、加工溝幅は再び広くなる。これは、ワイヤーまわりの形状による電界の集中によつても、プラズマの維持が可能なためであるが、9気圧雰囲気においてはこの程度の電力ではワイヤーまわりの電界集中だけではプラズマが維持できなくなり、その

ためギャップの狭い側だけでプラズマが存在していたものと思われる。このとき、プラズマはギャップ間に集中していることから加工溝幅は狭いが、ギャップが広がるにつれて電界の集中が少くなり、プラズマはその領域を減少させながら電極の方へ移動してゆき、更に加工溝幅が狭くなったのである。

第22図は前記と同じ条件で加工した場合の深さ方向の加工速度を測定した結果を示したものである。全般的に見てギャップが広がるにつれて加工速度が減少していく。これはプラズマの集中部分が被加工物表面から離れていくに従って、被加工物表面でのラジカル密度が減少するためである。この傾向はガス圧の増加に伴ってラジカルの拡散が起り難くなり、被加工物表面とラジカルとの反応で該ラジカルが消費され、表面ラジカル密度が減少してくるため、加工速度が低下するためである。しかし、3気圧と9気圧の加工速度の大きさに逆転が見られることから、ギャップの狭いところでは9気圧の方がラジカル密度が高くなっている。それは電極と被加工物間のラジカル密度は、まわりのプラズマ領域からの拡散によって決まり、3気圧雰囲気ではラジカル密度が低いが、9気圧雰囲気ではプラズマ領域がギャップ内に集中して存在しているため、ラジカル密度が逆に高くなっているからである。また、1気圧雰囲気においてギャップが狭くなるに従って、加工速度が低下、若しくは飽和しているように見えるが、これはプラズマの存在できない空間が広がってゆくため、ラジカル密度が減少したと推測される。

(絶縁体の加工特性)

本発明の装置は、高周波を用いているので、導体のみならず絶縁体でも加工をすることが可能であり、その1例を次に示す。

被加工物として絶縁体であるSiO₂を選び、加工ギャップを280μm、加工時間を4~6分に設定して加工を行った結果を第8表に示す。その他の加工条件は表中に記載している。

第8表 絶縁体(SiO₂)加工速度

ガス組成	電力(W)	加工速度($\mu\text{m}/\text{min}$)
SF ₆ : 1Torr He : 9atm	30	0.01
SF ₆ : 1Torr CO : 2Torr He : 9atm	34	2.7

これにより、還元剤としてCOを用いて、絶縁体であるSiO₂を十分に加工できることが実証された。また、その還元剤の効果も顕著に現れている。今回の条件では、加工速度はP型Siの場合よりも小さいが、これがCO濃度による表面の還元速度で加工速度が律速されている可能性があり、反応速度を更に高めることができる

可能性がある。

ここでは絶縁体としてSiの酸化物を示したが、各種セラミックスの加工も行うことができ、その場合には反応ガス等に新たな反応促進ガスを混合すれば、実用的に十分な反応速度が得られる。

(ガスフローの効果)

ラジカルと反応した被加工物の構成原子は、揮発性の反応生成物としてその表面から除去されるが、ガスフローを行ってない場合には、加工溝内にその反応生成物若しくは被加工物の構成原子のCVD（化学気層成長）によって再付着したものと思われる粒子の付着が見られることがある。

ボリッシング装置Bを用いて、ガスフローの効果を調べた。その結果、ガスフローを行わなかった場合、被加工物の表面は付着物で覆われていたが、ガスフローを行った場合には付着物が明らかに減少した。その表面の状態をタリステップで測定した結果を第23図に、またノマルスキーモード微分干渉顕微鏡で観察した結果を第24図に示している。加工条件は、He:10atm、SF₆:0.1atm、それらの混合ガスを1分間に6.8lの割合で流し、また電力は100W、加工時間は3分、加工ギャップは便宜上800μmとし、加工速度は5μm/minである。この結果を、ガスフローを行っていない第19図及び第20図に示した結果と比較した場合、カッティングとボリッシングの違いはあるが、ガスフローによって表面の付着物はなくなり、表面の粗さが減少していることが判る。

(6) 加工面の評価

前述のように、被加工物1の加工面の粗さをタリステップで測定するとともに、ノマルスキーモード微分干渉顕微鏡で観察して、その表面状態が優れていることを既に示したが、更にSPVS (Sur-face Photo Voltage Spectroscopy) を用いて、プラズマCVM加工面の表面準位の分布を測定し、更に他の加工方法である機械研磨面とケミカルエッティング面とArイオンスパッタリング面との表面準位密度との比較を行って、本発明によるプラズマCVM加工面の評価を行った。

金属や半導体の結晶の表面は、結晶内部の周期性、連続性が失われる一種の巨大な欠陥であり、局在する電子準位が現れる。更に、表面のステップや転移、空孔等の格子欠陥や吸着原子等に起因する電子準位もある。このように表面に局在する電子準位を広義に表面準位と呼んでいる。半導体材料を加工した場合、加工面には、表面粗さや加工変質層が存在し、物性的、結晶学的に鏡面でないものには、禁止帯内の様々なレベルに表面準位が現れ、また結晶学的に悪い加工面ほど、表面準位密度も高くなる。そして、表面準位が存在すると、電子と正孔の散乱、捕獲、放出、再結合が起こり、表面近傍のキャリア数の変化、易動度の減少、再結合速度の増加等、デバイスの特性に影響する原因になるので、ウェハーの表面は特に高精度な研磨が施されている。

プラズマCVM面と比較する機械研磨面としては、最も優れた機械研磨面と考えられている通常のSiウェハーの最終研磨面を用いた。また、物性的乱れの最も少ないと考えられる液中エッティング（化学エッティング）面と、更にArイオンスパッタリング面との比較も行った。

SPVSの測定原理は、Siのバンドギャップ以下のエネルギーを持つ赤外線を測定面に照射したときの表面での電子遷移の有無を測定するものである。もし、加工時にダメージが入ると、このとき生じる原子配列の乱れに対応した電子準位が、本来準位の存在しないバンドギャップ内に形成されることから、赤外線による電子遷移が可能となり、大きな信号が得られる。逆に、加工が理想的で表面の結晶性を乱すものでなければ、新たな準位が生じることはなく、信号は小さいものとなる。

第25図は、得られたデータから加工表面に形成された電子準位密度を求めたものである。この図からも判るように、最も穏やかな機械研磨による場合でも多くの準位が形成されているが、プラズマCVM面では非常に少なく、最も理想的な加工法と考えられる液中エッティング面と殆ど変わらない結果が得られている。

以上のように、数10μm/minという非常に激しい機械加工に相当する加工速度を得ながらも、その表面物性は、最も穏やかな機械加工面より優れており、化学研磨面に匹敵する特性を有することが判る。このことは、現状では機械加工に頼らざるを得ないセラミックスの加工において、本発明の装置により、高い信頼性を有する面を極めて高能率に得ることが可能となるのである。

〔発明の効果〕

以上にしてなる本発明のラジカル反応による無歪精密加工装置によれば、高周波電源によって発生された高周波電圧、電流を、整合器を通して任意の負荷に対してインピーダンス整合を取り、伝送線路等における電力損失を最小限に抑制して加工用電極に高周波電圧を印加することができ、しかも空洞共振器を介しているので、電圧を昇圧することができ、少ない電力で被加工物と加工用電極間に効果的に高圧プラズマを発生、維持することができる。

また、反応ガス及び不活性ガスを含む雰囲気気体の圧力を1気圧以上となしているので、プラズマの発生領域が空間的に限定され、ひいては反応ガスに基づくラジカル密度の分布が局在され、空間分解能の高い加工が可能となるのである。即ち、従来のプラズマエッティング等では考えられなかった高圧力ガス雰囲気中でのプラズマ生成により、従来の機械加工に匹敵する高い空間分解能が得られたのである。

その上、加工面の表面粗さは、0.1μm以下の鏡面に仕上げることが可能であり、特に、ボリッシング装置による加工面は、ガスフローを用いた場合、反応生成物の再付着による面の荒れは全くなく、表面粗さ0.01μm程度の極めて優れた鏡面が得られるのである。このときの

加工面は、物性的、結晶学的な観点から、従来最も優れた加工面が得られるとされている化学エッチング面に匹敵するものである。しかも、加工速度を $1 \mu\text{m}/\text{min}$ 以上にすることでき、特に条件によっては数 $10 \mu\text{m}/\text{min}$ にもなり、機械加工によって行う場合の加工速度に匹敵し、あるいはそれよりも速くなることもあります、通常のプラズマエッチングと比べても2桁以上大きい加工速度が得られるばかりでなく、被加工物の表面物性は化学エッチング面に匹敵する特性が得られるのである。

更に、高周波を用いているので、雰囲気ガスの圧力が1気圧以上でもプラズマを発生させることができるとともに、それを安定に維持することができ、更に被加工物も導体に特定されることなく、絶縁体にまでその加工種を広げることができるのである。

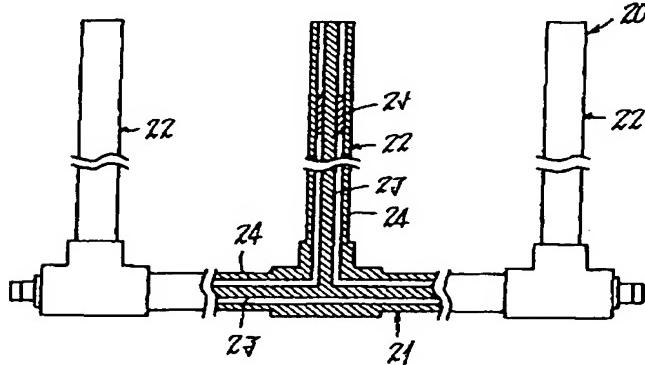
【面の簡単な説明】

第1図は本発明によるカッティング装置の簡略説明図、第2図は整合器の部分断面図、第3図は同じく整合器の等価回路、第4図は空洞共振器の断面図、第5図(a)は同じく空洞共振器の簡略図、第5図(b)はその等価回路、第6図はカッティング装置のガス導入系を示したブロック図、第7図～第11図はカッティング装置の各種制御回路のブロック図であり、第7図は高周波電源出力の制御回路のブロック図、第8図はインピーダンスのマッチング制御回路のブロック図、第9図は被加工物の送り制御回路のブロック図、第10図は各種ガス圧の制御回路のブロック図、第11図はワイヤー電極の送り制御回路のブロック図、第12図は本発明によるボリッシング装置の簡略説明図、第13図～第16図はボリッシング装置の各種制御回路のブロック図であり、第13図はガス導入系を示したブロック図、第14図は各種ガス圧の制御回路のブロック図、第15図はステージの制御回路のブロック図、*

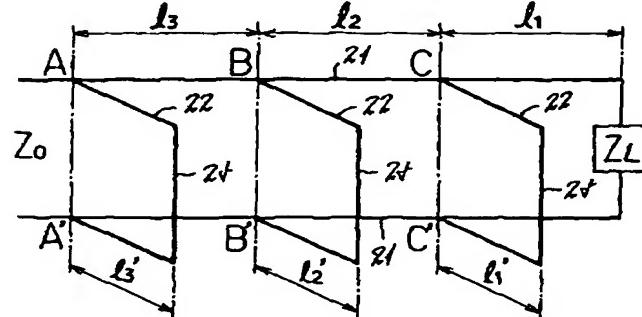
* 第16図はワイヤー電極の走査制御回路のブロック図、第17図(a), (b), (c)は加工に用いるワイヤー電極の耐久試験後の表面状態を示し、(a)は直径 $50 \mu\text{m}$ の銅ワイヤーの表面に真空蒸着によってアルミニウムを $4 \mu\text{m}$ の膜厚でコーティングしたもの側面図、(b)は直径 $50 \mu\text{m}$ の銅ワイヤーの表面にイオンプレーティングによってアルミニウムを $1 \mu\text{m}$ の膜厚でコーティングしたもの側面図、(c)はコーティングを行っていない直径 $50 \mu\text{m}$ の銅ワイヤーの側面図、第18図はカッティング装置による加工溝の形状をタリサーフで測定した結果のグラフ、第19図は同じく加工溝底部の表面粗さをタリステップで測定した結果のグラフ、第20図は同じく加工溝底部の表面状態をノマルスキ型微分干渉顕微鏡で撮影した結果を示した部分平面図、第21図は加工ギャップと圧力に対する加工溝の幅の変化を示したグラフ、第22図は加工ギャップと圧力に対する加工速度の変化を示したグラフ、第23図はボリッシング装置により加工した加工面の表面粗さをタリステップで測定した結果のグラフ、第24図は同じくその表面状態をノマルスキ型微分干渉顕微鏡で撮影した結果を示した部分平面図、第25図は各種方法で作成した加工面と本発明の加工面を表面準位密度で比較したグラフである。

A:カッティング装置、B:ボリッシング装置、1:被加工物、2:加工用電極、2a:ワイヤー、10:高周波電源、11:発振器、12:高周波増幅器、13:同軸線、20:整合器、21:主伝送線、22:スタブ、30:空洞共振器、40:反応容器、41:反応室、42:容器本体、43:上蓋、44:下蓋、45:絶縁体、46:ワイヤー送り装置、50:送り装置、52:ステージ、60:ガス供給ユニット、61:反応ガスポンベ、62:不活性ガスポンベ、70:センサ、80:制御装置。

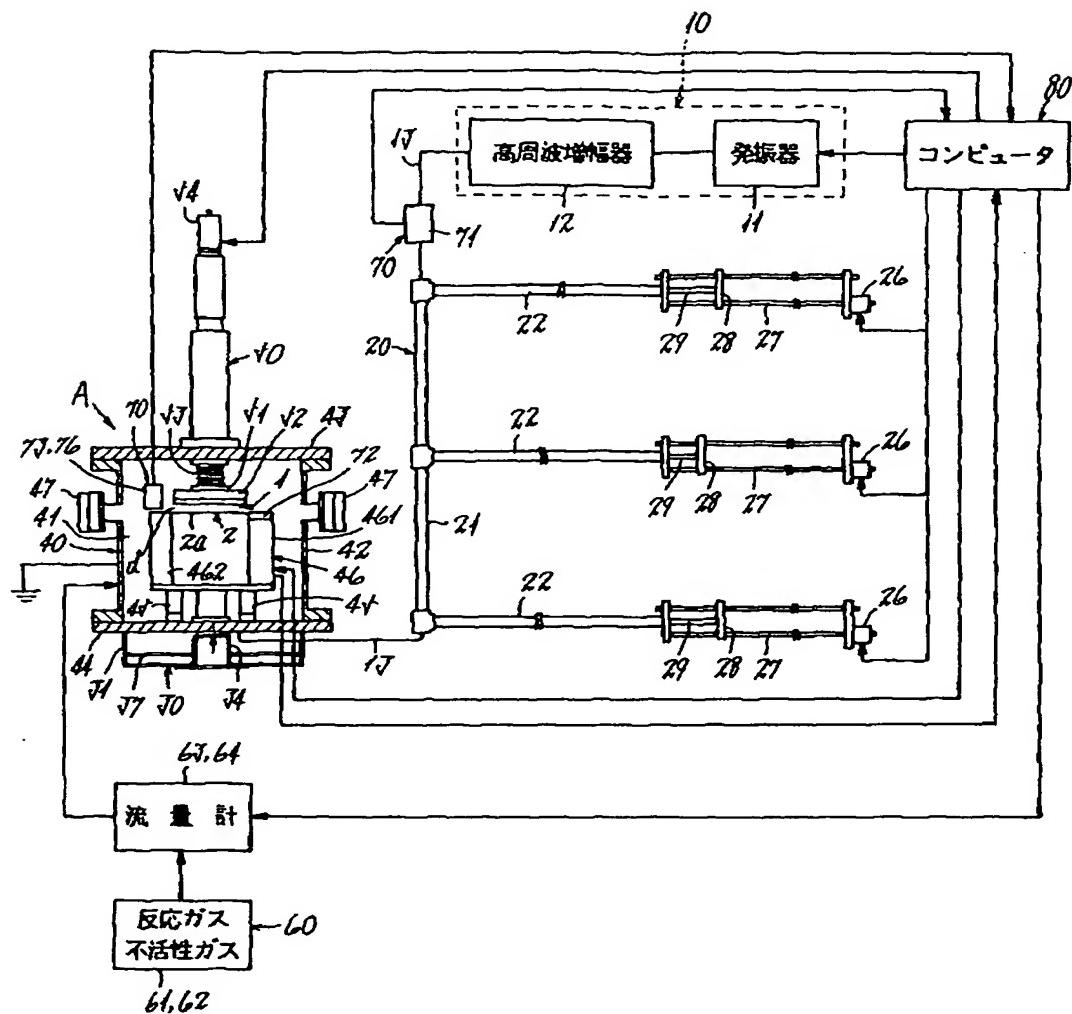
【第2図】



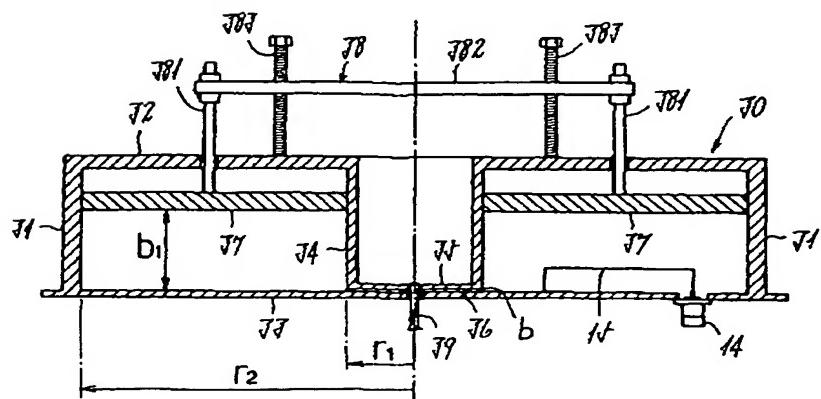
【第3図】



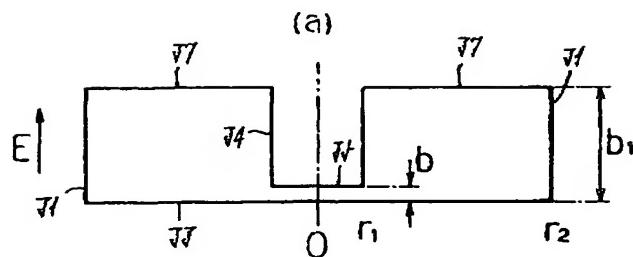
【第1図】



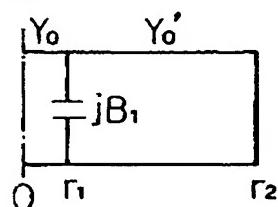
【第4図】



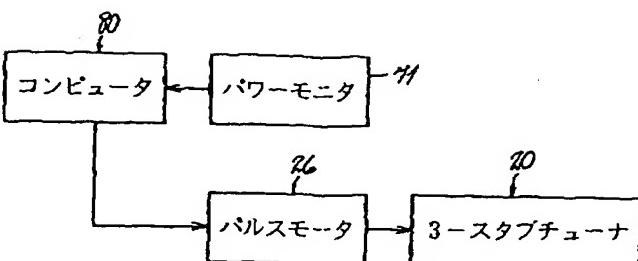
【第5図】



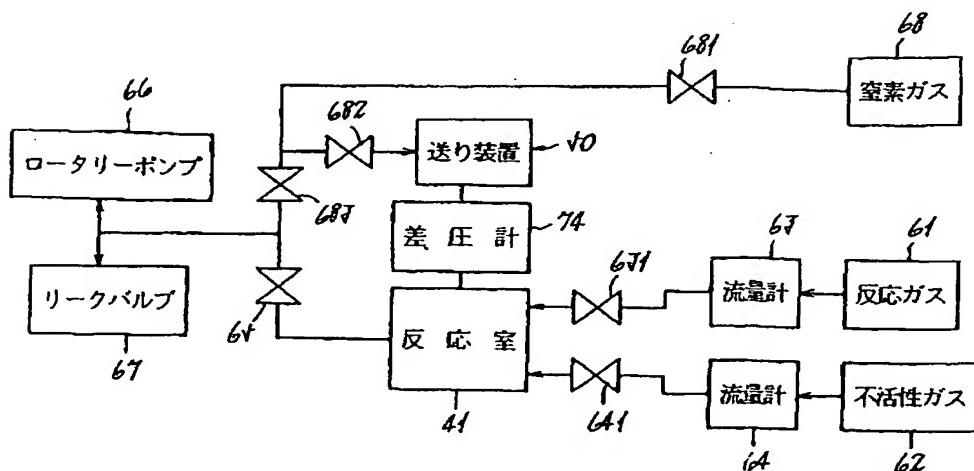
(b)



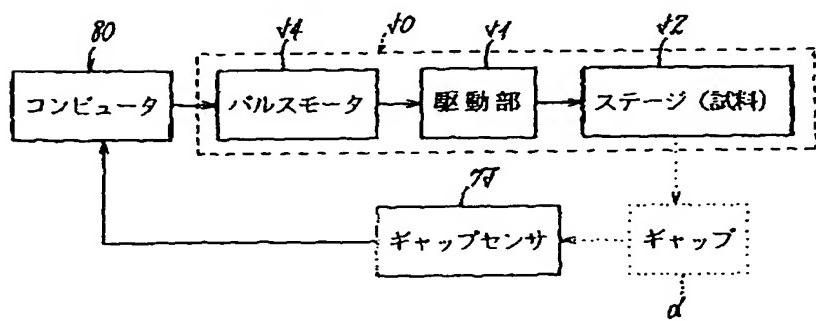
【第8図】



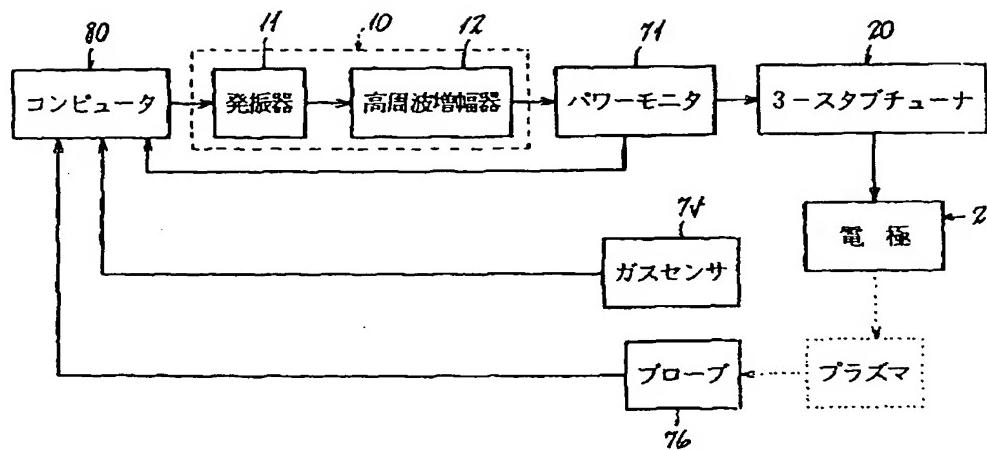
【第6図】



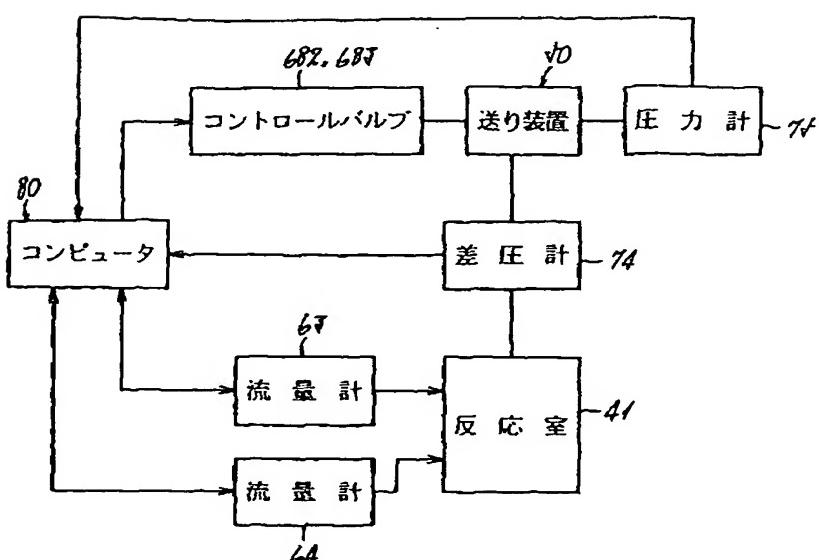
【第9図】



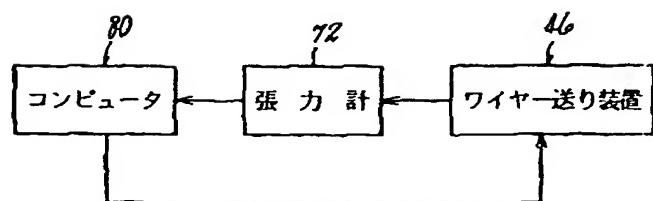
【第7図】



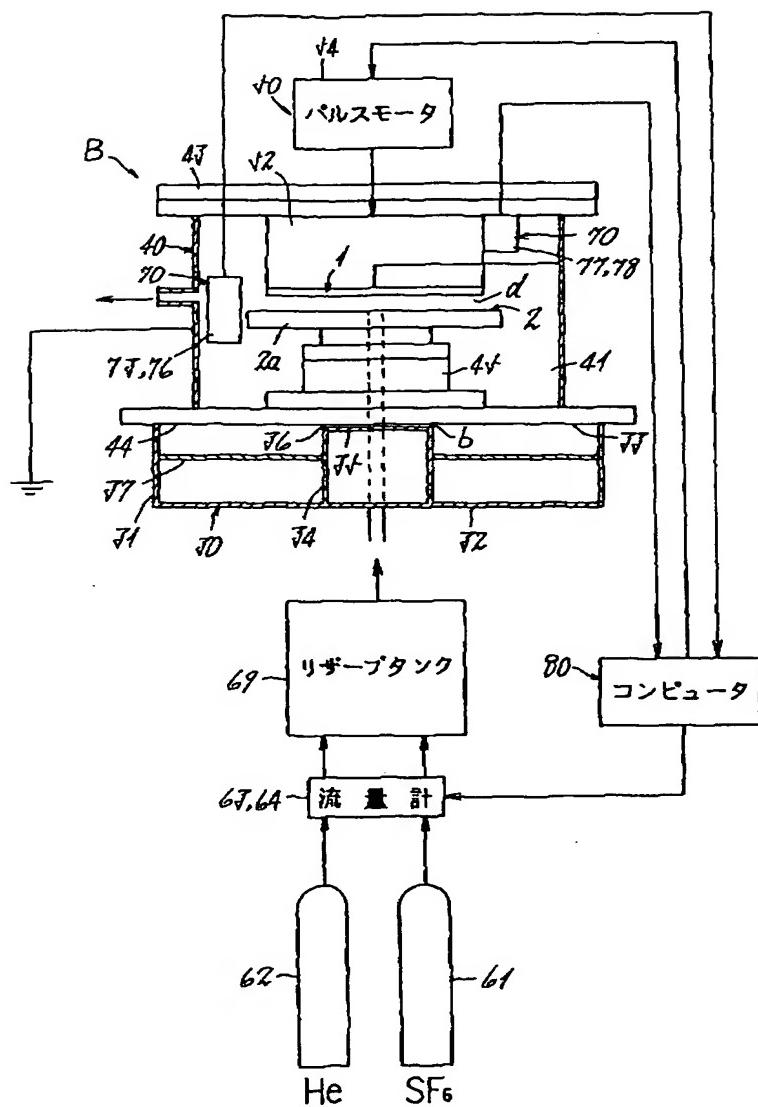
【第10図】



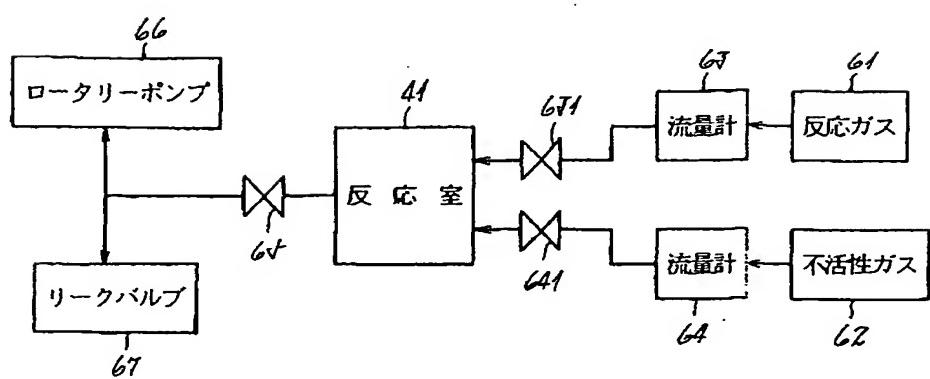
【第11図】



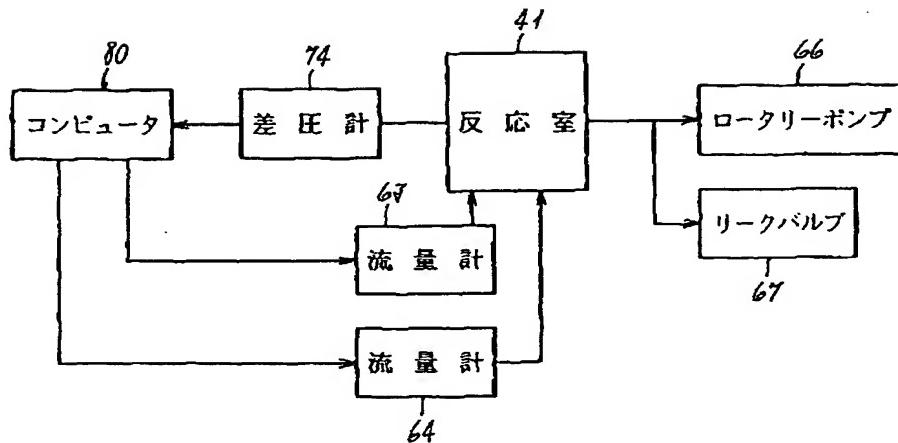
【第12図】



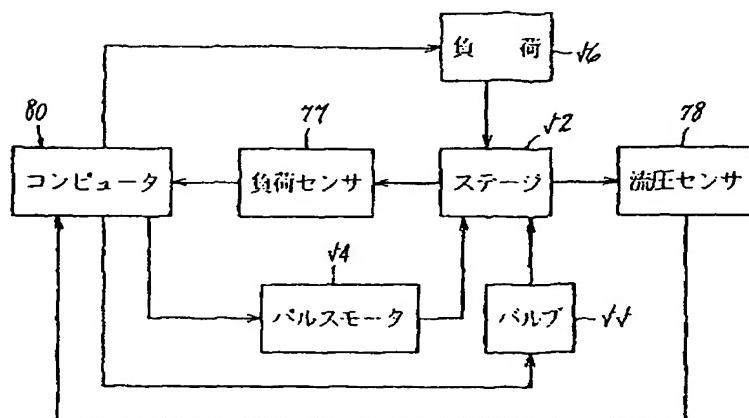
【第13図】



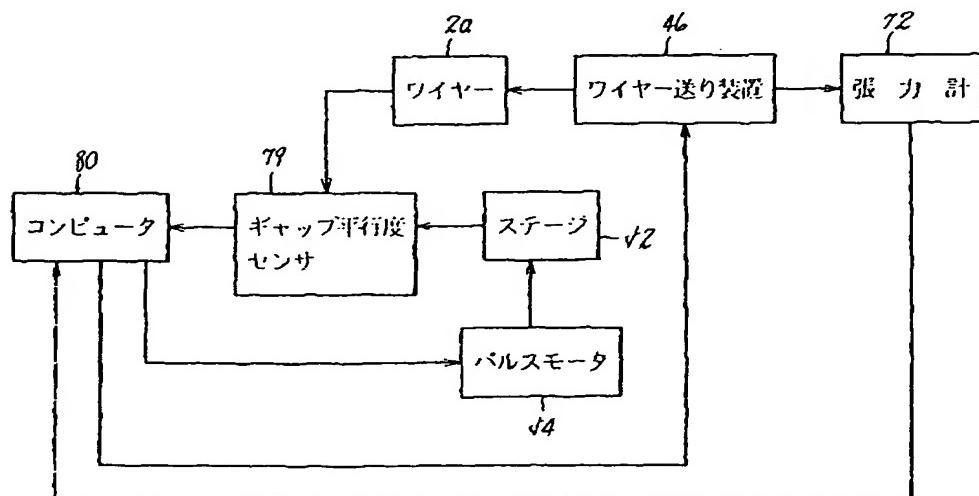
【第14図】



【第15図】

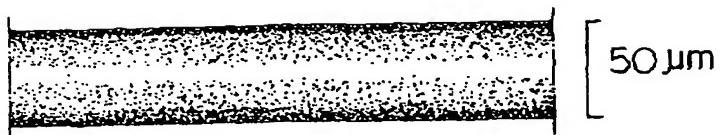


【第16図】

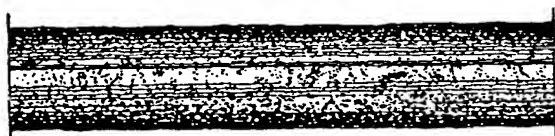


【第17図】

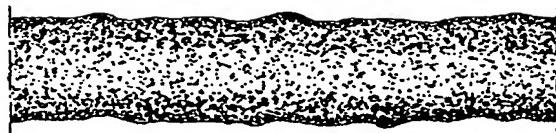
(a)



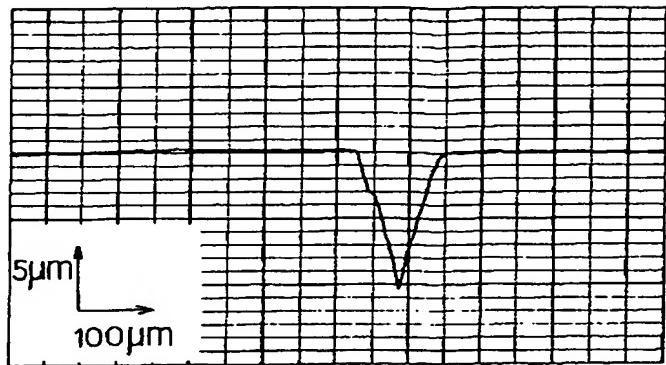
(b)



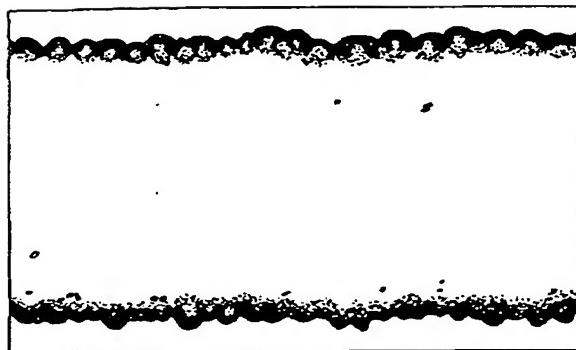
(c)



【第18図】

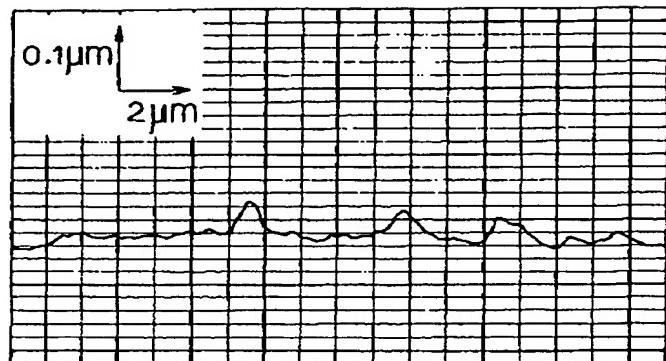


【第20図】

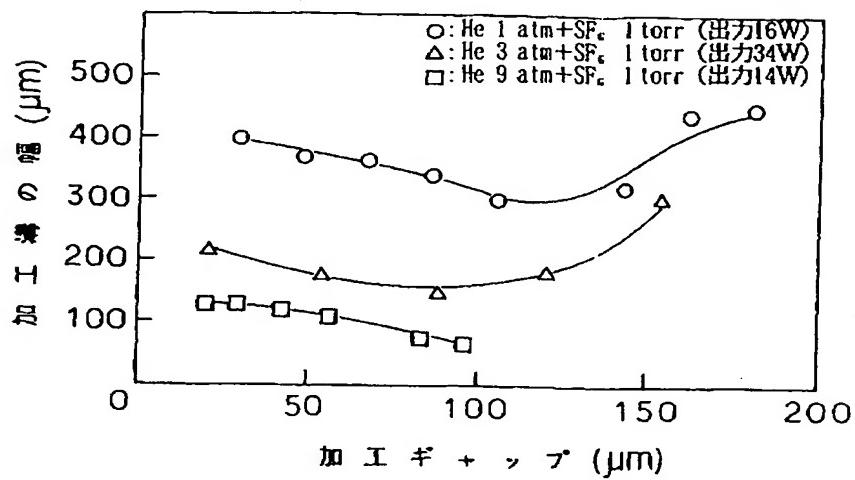


100 μm

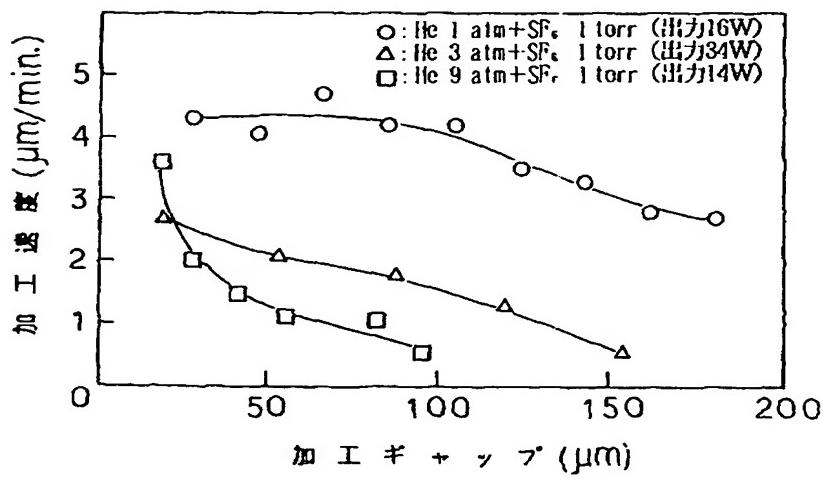
【第19図】



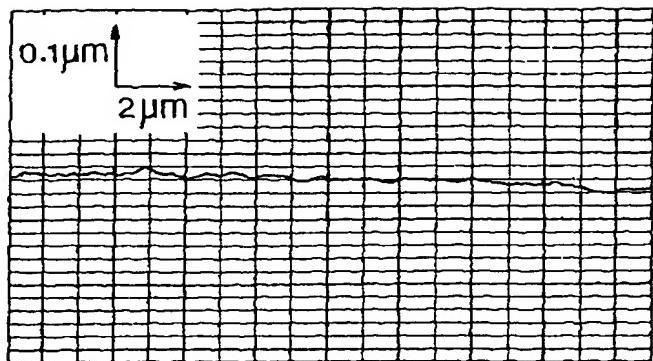
【第21図】



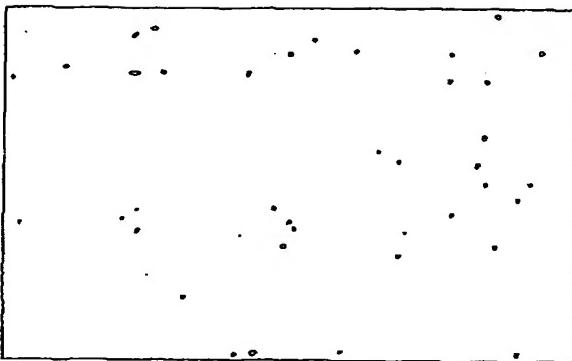
【第22図】



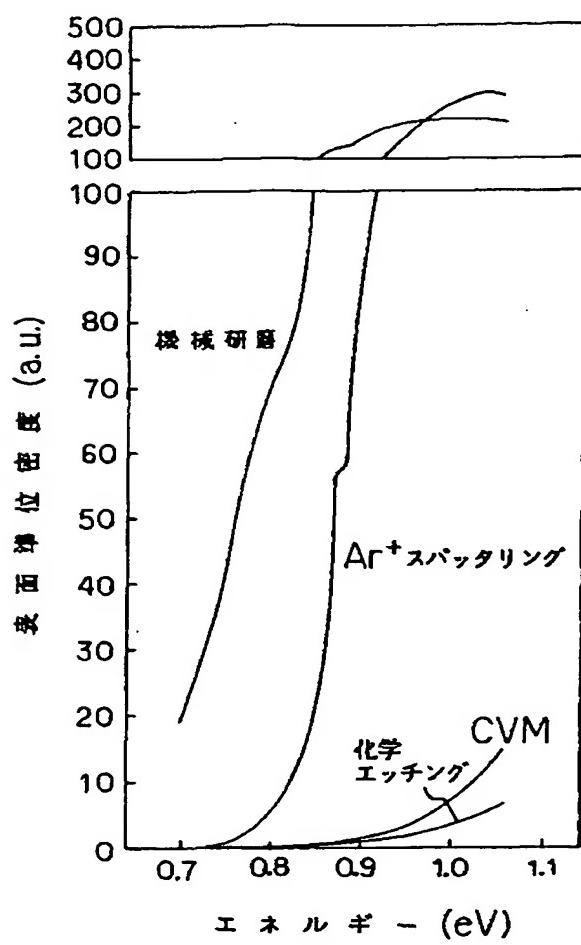
【第23図】



【第24図】



【第25図】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 平1-125829 (JP, A)
特開 昭64-23536 (JP, A)
特開 平1-297141 (JP, A)
特開 昭62-44576 (JP, A)
特開 昭61-216325 (JP, A)
特開 昭59-223005 (JP, A)